

需要家内直流配電における電気機器の電磁環境両立性を考慮した設置環境に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2014-08-02 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 酒井, 重嘉 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/16705

明治大学大学院理工学研究科

2013年度

博士学位請求論文

需要家内直流配電における電気機器の
電磁環境両立性を考慮した設置環境に関する研究

(Study on installation environment in consideration of electromagnetic compatibility of electrical equipment in direct current power distribution for consumers)

学位請求者 電気工学専攻

酒 井 重 嘉

需要家内直流配電における電気機器の電磁環境両立性を考慮した設置環境に関する研究

第1章 序論

1.1 本論文の背景と目的	1
1.1.1 本研究の背景	1
1.1.2 本研究の目的	3
1.2 本論文の構成と概要	5

第2章 直流配電における電磁環境に起因した障害

2.1 まえがき	7
2.2 電磁環境に起因した障害	8
2.2.1 直流配電に関する用語の整理	8
2.2.2 地絡時に発生する零相成分	1 2
2.3 直流配電における電磁環境に起因した障害事例	1 4
2.3.1 直流配電側地絡事故による交流配電側の機器への波及	1 4
2.3.2 高周波ノイズによる誘導	2 5
2.3.3 雷サージによる絶縁破壊	3 4
2.4 まとめ	4 0

第3章 直流配電の低周波領域におけるEMCに関する実験的検討

3.1 まえがき	4 1
3.2 直流配電における保護協調	4 2
3.2.1 地絡時における太陽電池モジュールの影響	4 2
3.2.2 地絡時における健全系統の不平衡電流	4 8
3.2.3 保護協調の最適化	5 0
3.3 直流配電地絡時の波及防止製品の開発と評価	5 4
3.3.1 一般的な波及防止	5 4
3.3.2 コンデンサ接地方式の特徴	5 4
3.3.3 抵抗付きコンデンサ接地方式の開発	5 5
3.3.4 抵抗付接地コンデンサを用いた試験	5 7
3.4 まとめ	5 9

第4章 直流配電の高周波領域におけるEMCに関する実験的検討	
4.1 まえがき	6 0
4.2 直流配電における高周波ノイズ	6 0
4.2.1 異なる接地方式における実験結果と検討	6 0
4.2.2 実験結果に対する考察	6 7
4.3 直流配電に発生する雷撃時の過電圧	7 4
4.3.1 直流配電の一般的な雷対策	7 4
4.3.2 雷電流通流時の太陽光発電設備における過電圧の実験結果	7 5
4.3.3 結果検討	8 4
4.4 まとめ	8 9
第5章 直流配電における過電圧の解析による検討	
5.1 まえがき	9 1
5.2 解析手法	9 1
5.3 太陽光発電設備のモデルによる解析結果および検討	9 1
5.3.1 検討モデル	9 1
5.3.2 過電圧の解析結果と検討	9 5
5.4 直流配電のモデルによる解析結果および検討	9 8
5.4.1 直流配電のモデルと解析条件	9 8
5.4.2 過電圧の解析結果	1 0 3
5.4.3 結果検討	1 1 0
5.5 まとめ	1 1 2
第6章 結論	1 1 3
参考文献	
謝辞	
本論文に関連する発表論文	

第1章 序論

1.1 本論文の背景と目的

1.1.1 本研究の背景

これまで需要家は主に電力会社から電源を供給していたが、環境への配慮やBCP（Business Continuity Planning：事業継続計画）などから、太陽光発電設備をはじめとした分散電源を構内に設置する事例が増加している^[1]。一方で、負荷設備は、交流を直接使うのではなく、交流を直流に変換して駆動する機器や、その直流をさらに交流に変換する機器が増加している。このため変換段数が低減し、電気設備全体の効率向上を目的とした直流配電が注目されている。これまではデータセンタでの導入が主であったが、これはデータセンタの主要機器がサーバであり、直流で駆動するためである。近年では、一般家庭への導入も検討されている。これは一般家庭で使用される家電製品のほとんどが直流で駆動するためである。また、事務所や工場などにおいてもパソコンや生産装置といった直流で駆動する機器が多くあり、交流配電と直流配電の混在した方式の導入が増えている^[2]。このように、直流配電の導入促進とともに、障害事例が報告されるようになってきている。直流配電は、一般的に交流配電と連係されるため、これらの障害事例に対し交流配電を含めた安定的な運用が求められている。

障害事例の多くは、地絡サージや雷サージなどの一過性の過電圧によるものや、電力変換の際に発生する高周波電流が原因となっている。電力変換装置から定常的に発生する高周波電流、一過性の地絡サージや雷サージなどが電磁ノイズとなり、様々な障害につながることを防止するため、電磁環境の両立性について検討することが必要である。電磁環境両立性について事前の検討が不十分であると、サージ電圧により電気機器に絶縁破壊や、高周波電流による電気機器の不要動作が発生する恐れがある。最近の電気機器はお互いがハード・ソフト両面で密に接続されていて、たった一台の機器の故障が重大な災害に繋がる場合もある。直流配電を安定的に運用するための最も基本的な要点として、電磁環境両立性が考慮された電源環境の構築は、電源供給者としての義務である。電磁環境両立性が保たれた直流配電について検討するため、筆者が実際に経験した事例やその他の報告例についてまとめると、「接地」という共通のキーワードが問題解決の糸口として見えてくる。

直流配電に関する研究事例としてそのほとんどは、分散電源の最適な配置計画に関するもの、半導体電力変換装置の効率向上を目的とした制御方法に関するものである。電源品質など電磁環境に関する研究報告として、例えば、[3]では、直流配線用遮断器の短絡電流の遮断性能比較、[4]、[5]では、直流配電における発振現象の発生条件について解析的な検討結果を報告している。これらの研究も直流配電の安定運用において重要ではあるが、電磁環境両立性の問題を解決するものではない。電磁環境両立性が保たれた直流配電を構築するためには、「接地」について検討することが重要であり、このキーワードが電磁環境に与える影響について明らかにする必

要がある。

接地方式は大きく3つに分類されるが、この違いが電磁環境に与える影響についての研究報告は皆無である。重要であるが研究されていないのは、定性的にも定量的に障害事例を検討し対策をすることの難しさにあると考えている。サージ電圧は一過性であることが多く再現性に乏しく、ケーブル長さや配置など電気設備の電路の施設状況によってもその大きさなどが異なる。半導体電力変換装置から発生する高周波電流についても同様である。実際に運用されている需要家において、同じ電気機器が設置されていても、障害が発生する場合とそうでない場合があることから、これは明らかなことである。このような理由が、電磁環境両立性に関する研究を遠ざけてきた点であると考えている。しかしながら、昨今の電子機器の急速な普及を背景に、電磁ノイズ発生源の一要因となる高周波電流は増加し、さらに電子機器は動作電圧の低電圧化により電磁ノイズに対して脆弱になっている^[6]。電磁環境両立性を考慮した電気機器の設置環境についての検討は、今後もますますその必要性が増してくる。また法制度面でみても、国際規格整合化が進み、「電気設備の技術基準」において電磁環境に関連するIEC規格が取り入れられる動向がある。このことから、電気設備に関係する技術者の電磁環境への関心はますます高まる。

このような背景を受け、電磁ノイズの発生源であり、また被害機器にもなり得る電気機器を直流配電で使用した場合の電磁環境両立性について研究し、最適な電源環境を提供していくことは、電気設備を提供する技術者として、電源の安定供給という社会性の高い、大変、意義があることである。

1.1.2 本研究の目的

本研究の目的は、需要家が直流配電を導入し安定運用を行うために必要な条件と判断材料を明らかにすることである。本論文では特に、電磁環境両立性を保つために重要と考えている、「接地」について、

- ・保護協調の最適値
- ・「接地」方式の違いと電磁環境の定性的・定量的把握

この二つに着目した。これは、第2章で紹介する障害事例を「接地」についてまとめると、①地絡電流（商用周波数成分の零相電流）、②高周波電流、③サージ電圧、この三つに原因が絞られる。地絡電流や高周波電流は、対地を介在して流れる。また、サージ電圧も電路と対地を介した現象である。これらについて、「接地方式の違い」をポイントとして明らかにすることで、需要家の直流配電導入に寄与できると考える。そこで「接地」に関する二つのテーマを三項目、①地絡、②高周波電流、③サージ電圧に分類し、それぞれの項目において接地方式が異なることとの関係を明らかにする。

ここで、あえて断りを入れるが、研究対象となる「接地」とは、接地極など大地内部の状況に関連することではなく、接地極同士をどのように接続するかといった方式に関するものである。

①地絡保護協調の検討において電路の対地電位を明らかにする必要がある。この対地電位は主に電路と対地間のインピーダンスによる。電路は基本的に大地から絶縁されているが、絶縁材料が誘電体となるコンデンサの特性を示すことが知られている。このため電路と対地間のインピーダンスとなる要因として、電路と対地間の静電容量（以下、対地静電容量）、接地工事によって得られる接地抵抗がある。このうち、対地静電容量を構成する要素として、ケーブルや太陽電池モジュール（以下、モジュール）がある。ケーブルの対地静電容量は電線メーカー等の技術資料に記載があるが、モジュールはこれまで報告された例は無い。このため、モジュールの対地静電容量を実験的に求めるとともに、保護協調の最適解を検討する。

②電気設備技術基準のIEC規格等の国際規格整合化に伴い、接地方式を大きく三つに分類し、さらに接地極として建物構造体の使用が条件付で認められることとなった。建物に多く採用されている電圧形インバータにより高周波電流は発生するが、これは一般的に電流源で定義されている。この高周波電流が零相成分となり、対地静電容量などを介して接地極や構造体を流れる。このため接地の構成が異なると、高周波電流源から見た電気設備の等価回路は異なる。高周波電流は、その大きさや周波数帯域により電磁ノイズの原因となるので、接地方式の条件により、電磁ノイズの影響が出やすい方式とそうでないものがあると考えられる。従って、三つに分類される接地方式それぞれにおいて高周波電流の流れ方を実験的に明らか

にし、電路側の最適な接地方式について検討する。

- ③直流配電の電源として、太陽光発電設備や蓄電池設備などがある。このうち、太陽光発電設備は建物の屋上や構内の空地などを利用して設置される。蓄電池設備もその規模によっては建物の外部に設置される場合がある。建物の雷保護はJIS規格などに基づいて^[7]、避雷針や棟上導体などの外部雷保護、SPD (Surge Protective device) の設置やボンディングなどの内部雷保護が行われる。しかしながら、建物外部に設置される太陽光発電設備は日陰などの問題から避雷針は設置できず、直撃雷などの被害を受けやすい。このため、太陽光発電設備は直撃雷や誘導雷、逆流雷などの影響を受けるものとの前提で、内部雷保護を確実に施設する必要がある。そこで、太陽光発電設備において異なる接地方式での条件下で、直撃雷を受けた場合の直流配電に発生する過電圧を実験的に明らかにし、最適な接地方式について検討する。また、大規模な直流配電における効果的な接地方式について数値電磁界解析プログラムを用いて解析的に明らかにする。

1.2 本論文の構成と概要

本論文は、研究の背景と目的を述べた本章（第1章）を含めて6つの章から構成されている。

第2章は、直流配電の電磁環境両立性が保たれなくなった結果により発生した障害事例について述べ、本研究において重要と考えている接地方式と地絡保護協調を検討することの必要性に触れる。電磁環境に起因した障害事例は多岐に渡るが、ここでは障害の要因について周波数と継続時間という軸によって分類した。継続時間については、秒単位で電磁ノイズが発生し障害に至るケースを継続性のあるもの、十数ミリ秒以下程度の事例を一過性のものとした。周波数の分類は、2 kHz以下を低周波、2 kHzを超えるものを高周波とした。

低周波で一過性の障害事例として、地絡による直流成分を含んだ零相電圧の波及、高周波で一過性のものとして、落雷時に発生するサージ電圧による機器の絶縁破壊、高周波で継続性の障害事例として、電圧形インバータのスイッチングによる高周波電流が起誘導源となって発生した機器の不具合事例について明らかにする。

第3章は、直流配電における保護協調について述べる。保護協調は、短絡、地絡、そして絶縁協調の三つに分類される。このうち、本論文では地絡協調に関する研究を行っている。これは、短絡協調や絶縁協調についてはこれまでも多くの報告がなされているが^[8]、地絡協調はいまだ経験則によるところが大きく、漏電遮断器などの不要動作事例がなくなる。これは電気設備に用いられる機器の対地静電容量が明らかではないことが大きい。そこで、モジュールの対地静電容量の実測、実測結果からモジュールの対地静電容量を求める一般式、および漏電遮断器の整定値の算出方法について数式を用いて明らかにする。更に、直流配電における地絡時に発生する直流成分を含んだ対地電圧による変圧器の偏磁現象の対策製品を開発したのでこれについて述べる。

第4章では、大きく二つの検討を行っている。一つ目は、接地方式の違いによる高周波電流の流れ方、もう一つは、雷撃時に直流配線に発生する過電圧についてである。

接地方式は三つに分類されるが、接地方式の違いによる高周波電流の様相について、実際に直流配電を構築し、実験的に明らかにする。接地方式が異なると、高周波電流の流れ方、高周波電流によって発生する電圧に違いがあると考えられるが、実験設備はできるだけ実際の設備に近い状態を再現した。

雷サージについては、実際の太陽光発電設備に雷電流を想定したサージ電流を注入し、直流配線に発生する過電圧について実験的に解析を行い検討する。雷対策においてボンディングは効果的な対策であると考えられる。実験においても、機器相互におけるボンディングの有無に

よる過電圧の大きさなどの違いについて検討する。

第5章は、第4章で行った、実際の太陽光発電設備へのサージ電流注入試験によって得られた結果について、数値電磁界解析の一つであるFDTD (Finite - Difference Time - Domain method) 法を用いたシミュレーションを行い、実験と解析を比較し、シミュレーションを行う場合のモデルの妥当性について検証する。更に、得られた結果に基づいて、より一般的な直流配電についてモデル化し、シミュレーションによって、雷被害を受ける可能性の高い、太陽光発電設備への落雷時に直流配電に発生する過電圧の接地方式の違いによる影響、効果的な対策について検討する。

最後に第6章は、本研究の結論を述べ、今後の課題を示す。

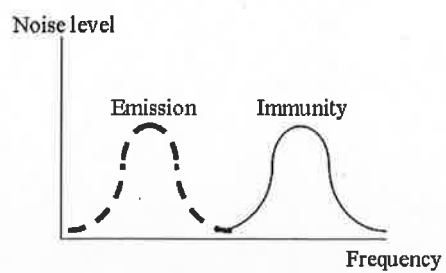
第2章 直流配電における電磁環境に起因した障害

2.1 まえがき

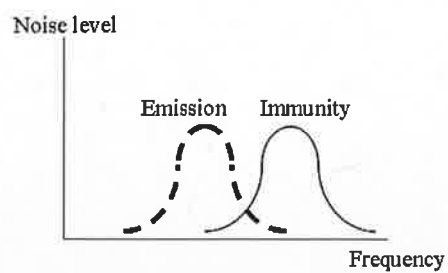
電気機器が設置される電磁環境では、両立性（電磁環境両立性：Electromagnetic Compatibility）が考慮されなければならない。両立性とは電磁ノイズの発生量（Emission）と電磁ノイズに対する感受性（Immunity）と関係を示すものである。半導体電力変換装置が普及した昨今の電気設備では、これらから発生する高周波電流などの影響でエミッションレベルを零に保つことは不可能であることは言うまでもない。従って、ある電気機器を、既存の電気設備に接続する場合、ある一定レベルのエミッションレベルとなる電磁環境下でも正常に動作するイミュニティレベルを持つことになる。この相反するエミッションとイミュニティを同じ電気設備の設置環境下で共存させることが、電磁環境両立性である。

電気機器の障害は、この電磁環境両立性が保たれなくなった時、つまりエミッションレベルがイミュニティレベルを上回ることにより発生する。図2-1は、電磁環境両立性について説明した図である。図2-1 (a) は、ある機器が発生する電磁ノイズのエミッションレベルと、被害を受ける機器の電磁ノイズに対するイミュニティレベルに周波数帯域の違いが見られる場合である。電気機器は、それぞれに反応時間（例えば、CR回路を用いたリレーなど）が有り、これに近い周波数帯域の電磁ノイズで無ければ反応せず、障害が発生することはない（実際にはレベルだけの問題ではなく、連続する時間やその間隔も関係する）。図2-1 (b) は、エミッションレベルとイミュニティレベルで周波数帯域が一部で重なるところがあり、被害機器の不要動作が発生する。図2-1 (c) は、周波数帯域が重なり、エミッションレベルがイミュニティレベルを全帯域において上回る場合であり、この状態では、エミッションレベルの低い機器は障害が発生する。図2-1 (d) は、図2-1 (c) とは逆にエミッションレベルがイミュニティレベルを全帯域において下回る場合であり、この状態において機器の障害は発生しない。

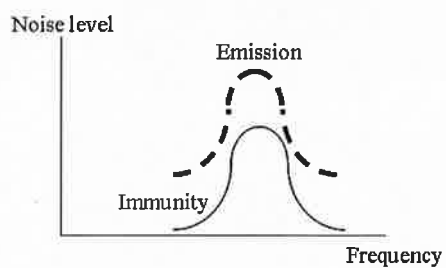
つまり、以降の「接地」に関する検討において、常に図2-1 (a) や (d) の環境を保つことができる方式を明らかにしていく必要がある。



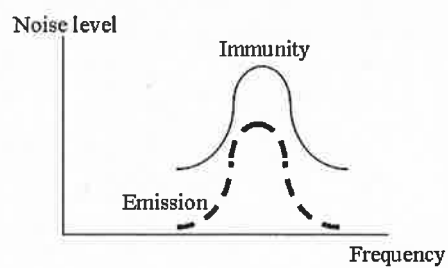
(a) 安全な電磁環境



(b) 帯域によって安全な電磁環境



(c) 障害が発生する電磁環境



(d) 安全な電磁環境

図 2 - 1 電磁環境両立性の説明

2.2 電磁環境に起因した障害

電磁環境の両立性が保たれなくなり発生した障害事例を示す。説明に当たり、基本的な電気設備に関する用語、本研究において関連する用語について整理する。また、障害事例では、先ほどの、①地絡電流、②高周波電流、③サージ電圧、の三つの原因のうち、①の地絡に関するものを一般的な状況に置き換えて説明する。次に、実際の障害事例について示し、最後に、障害事例を分類し、1.2節で挙げた①地絡、②高周波電流、③サージ電圧に関する研究の必要性に言及する。

2.2.1 直流配電に関する用語の整理

図2-2は、交流配電を含めた直流配電設備の構成例を表したものである。一般的に建物の電気設備で用いられる交流配電の結線方式は三つにまとめることができる。この変圧器のいずれかに直流配電は接続されている。直流配電の場合、単相2線式が一般的であるが、まれに単相3線式が採用されている^[9]。直流電源として代表的なものは、太陽光発電設備や蓄電池設備がある。直流電源で電源供給される負荷として、LED照明、サーバやパソコンなどの電子機器、小型モータなどがある。この例では蛍光灯照明、プリンタなどのコンセント負荷は交流電源の単相3線式から電源を供給されている。空調・ポンプ、エレベータなどの大型の動力負荷は交流電源

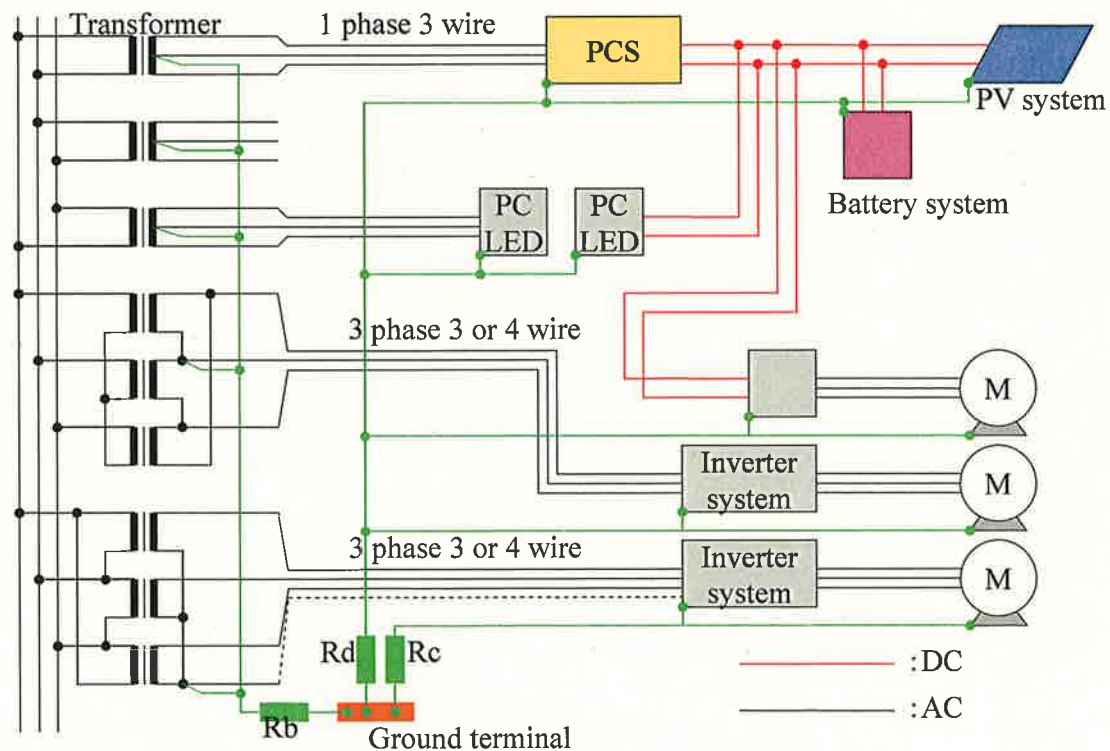


図 2-2 交流配電を含めた直流配電設備の構成

の三相3線式で供給される。図2-3は実際に採用されている直流配電の例である。現在では、太陽光発電設備と蓄電池設備が併用されるケースが多いが、まれに太陽光発電設備、もしくは蓄電池設備単独で直流配電の電源となる場合も見られる。一般的に交流電源と連係がとられており、電源容量の過不足時の電圧上昇や電圧低下に対応するようにしている。図2-3では、太陽光発電設備、蓄電池設備の発電電圧が異なるため、DC/DCコンバータを介してDC280Vに昇圧し連係している。このDC280Vのように共通となる直流電圧をバス電圧もしくはDCバス電圧と呼んでいる。この例において負荷はパソコンやLED照明などである。DC/DCコンバータが機器に内蔵され、DC280Vを直接供給するものや、DC280Vを一端、負荷に外付けされるDC/DCコンバータで使用電圧まで降圧し供給するものがある。交流配電と直流配電の接続箇所には半導体による電力変換装置が設置され、交流と直流間の電力融通を行う。交流配電の電圧レベルは、国内においてJIS規格で標準電圧が定められているが、直流配電については審議中である^[10]。

ケーブルや電気機器はそれぞれにインピーダンスを持っている。2.2節で示した三つの原因が電路と対地間における現象であるため、電路と対地間のインピーダンスに着目する。ケーブルなどの電設設備で使用される機器や材料は、電路絶縁の原則により、基本的には対地から絶縁されている。このため、絶縁材料が誘電体となり電路と大地間の静電結合による容量性インピーダンスが構成される。これは対地静電容量（ストレーキャパシタンス）と呼ばれている。

接地設備は、高低圧混触時の変圧器2次側の電位上昇を抑制する目的としてB種接地工事、地絡時の感電防止を目的としてC種もしくはD種接地工事が施される。変圧器は、接続される電線の電圧階級により電気設備技術基準で定められているB種接地工事が施される。B種接地工事

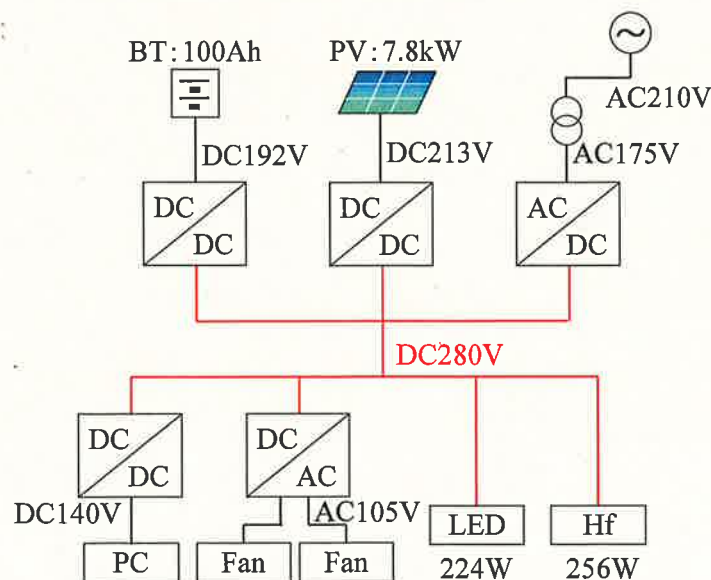


図2-3 直流配電の例

は、一方に電極となる銅製で板上の接地電極を接続し、地中に埋設される。もう一方の接続先は、単相3線式などの場合は変圧器2次側の中性点、三相3線式で変圧器の結線方式により中性点がない場合は、その変圧器2次側の一端を接続することになる。一般的には第2相（通常、S相と呼ぶ。）となる端子が用いられる。図2-2の抵抗 R_b [Ω] はB種接地工事で得られる抵抗を表している。この抵抗は、B種接地の電極から10 m 離れた箇所に電圧測定極、さらに10 m 離れた箇所に電流注入極を大地に埋設し（理想的には、接地電極、電圧測定極、電流測定極はすべて直列に配置）、B種接地電極と電流注入極に電流を流し、電圧測定極で得られた電圧を流れた電流で除した値である。このため、地絡事故時に電流が流れるC種やD種接地工事の電極や構造物が10 m 以内にあれば、測定当初のB種接地工事で得られる抵抗よりも実際には小さくなる。しかしながら、直流配電を採用する需要家は比較的、敷地が大きく、B種接地工事の電極とC種やD種接地工事のそれとは10 m 程度離れている場合が一般的であると考えられる。地絡事故が発生した場合の、電路と機器や配電盤のC種やD種接地工事の接地点との間の抵抗は R_g [Ω] で表現される。これは図2-4で示している。一般的に地絡事故は、充電部の絶縁不良が進行したものや、使用者の操作間違いなどにより充電部が接地などに直接接触する場合が多い。地絡時に電路と対地が接続される際のアーク電流の検討においては、インダクタンス成分も考慮される

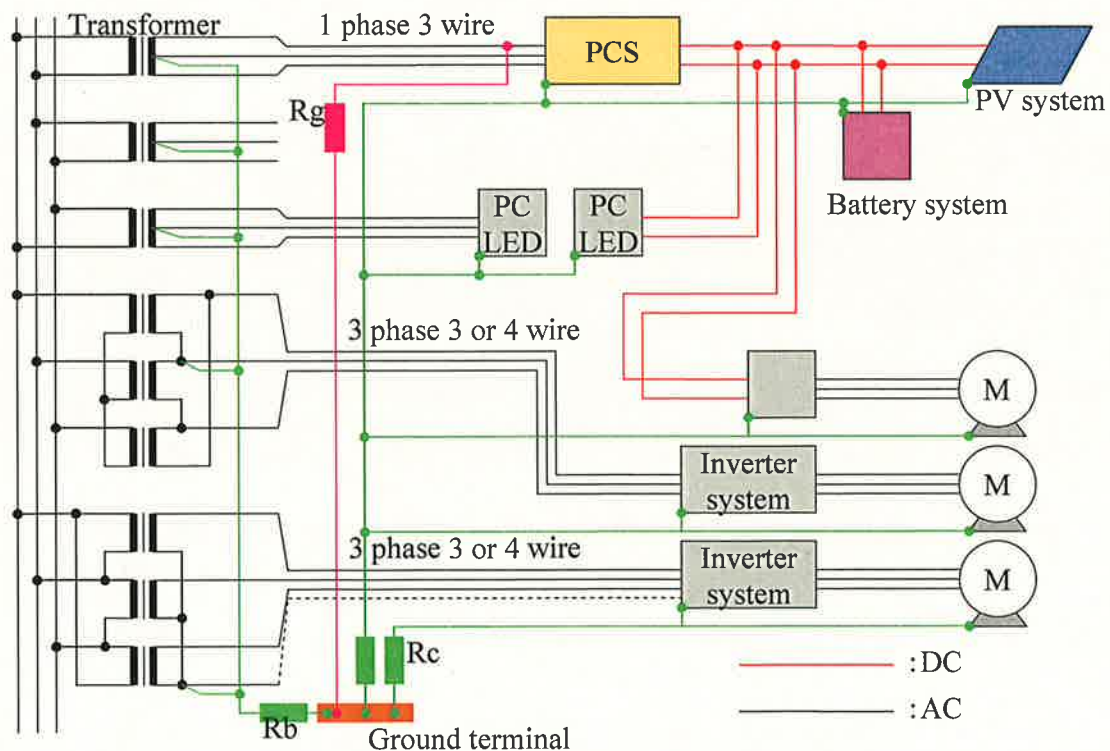


図2-4 単相3線式R相電路に抵抗 R_g が接続

が、本研究では抵抗のみで検討している。接地方式は、交流配電・直流配電共に、3種類に分類される。TT接地方式、TN接地方式、そしてIT接地方式^[1]である。これは図2-5に示す。一般的に国内ではTT接地方式が主流であるが、データセンタではTN接地方式やIT接地方式が、また、病院の手術室など特殊施設ではIT接地方式が採用されている。

直流配電と交流配電の連係は、半導体を用いた電力変換装置を介して行われる。大別すると、変圧器が内蔵されているものと、変圧器が内蔵されていないもの（トランスレス方式）がある。変圧器が内蔵されているものはさらに、変圧器の設置位置が交流側の電線路に設置されるものと、半導体でスイッチングされた高周波の電線路に接続されるものがある。一般的に数kVA程度の小容量ではトランスレス方式が採用されている。大容量は、変圧器を内蔵しているものが一般的であるが、経済的な観点からトランスレス方式を採用する場合もある。

2.2.2 地絡時に発生する零相成分

図2-4に抵抗 R_g が単相3線式R相電路の端末と基準点に接続された場合を示す。抵抗 R_g が単相3線式R相電路の端末と基準点に接続された場合における、基準点から見た電線路等の電位はB種接地工事の接地抵抗、地絡抵抗 R_g そして対地静電容量により算出される零相電圧によって決まる。この電圧は、対象座標法や鳳-テブナンの定理等を用いれば簡単に求めることができる。単相3線式電路の場合、抵抗 R_g が接続される前の各相と基準点間に発生する電位は大きさが同じであるが、位相差は 180° となっている。したがって、この電位によって発生する零相電流は、各相と基準点間に接続されているインピーダンスの大きさや位相の条件が同じであれば、零相電流はゼロとなる。しかしながら、抵抗 R_g が接続されると、零相電圧が発生しこれに伴い各相

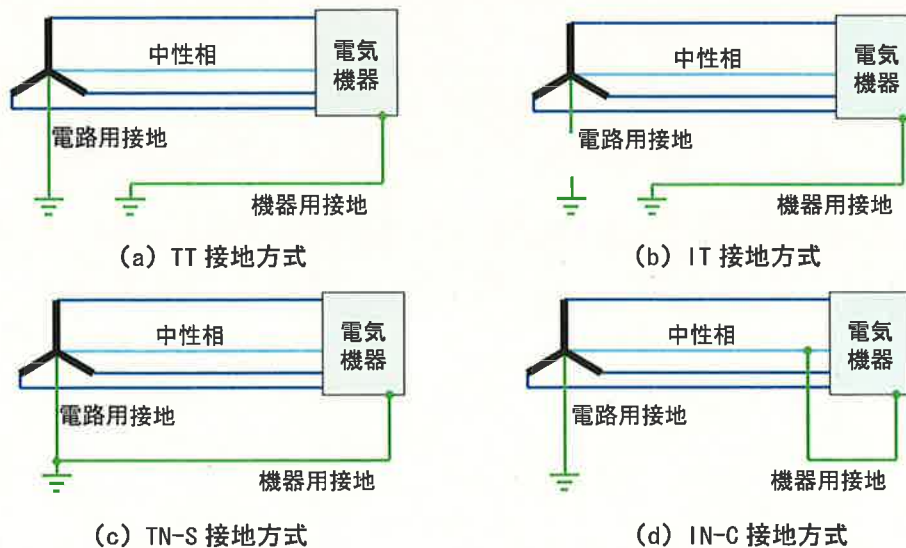
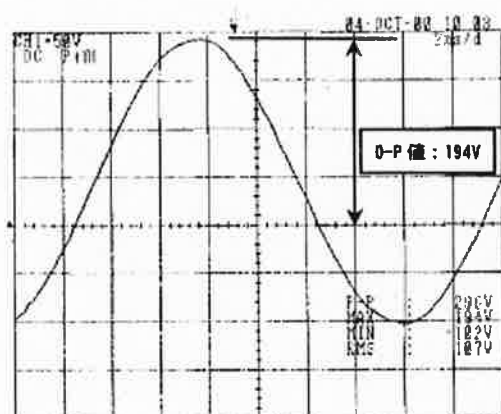


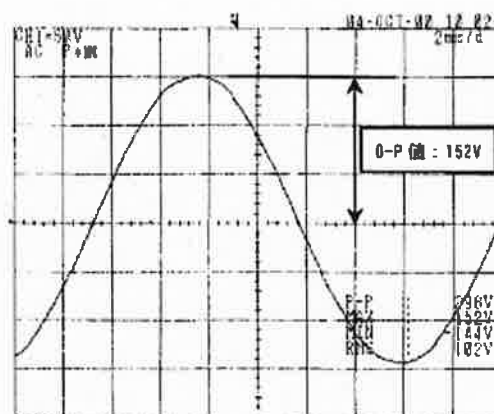
図 2 - 5 接地方式の説明

の電位は大きさに差が発生する。さらに、位相差は 180° ではなくなり、零相電圧の位相に影響される。各相の電位に零相電圧に起因する不平衡があると、零相電流が発生する。三相3線式電路の端末と基準点に抵抗 R_g が接続された場合も同様である。

B種接地極は特殊なケースを除けば、一般的に同じ電気室に設置される変圧器全てで共用される。このため、例えば三相3線式R相電路の端末と基準点間に抵抗 R_g が接続され、零相電圧が発生し変圧器の一端と基準点間に電位が発生すると、単相3線式電路の中性点と基準点間にも同様の電位が発生する。この対地電位が機器の絶縁破壊電圧を上回る場合がある。また、B種接地工事が共用されることは、地絡事故系統以外の健全な系統の漏電遮断器が不要に動作する要因の一つである。抵抗 R_g が直流配電の電路の一端に接続された場合も同様である。ただし、直流電路に抵抗 R_g が接続された場合、零相電圧に直流成分が含まれることになる。これは図2-6に示す。図2-6は、直流電路で地絡が発生したときにおける、交流電路側の対地電位の状況である。零相電圧が直流となるので、図2-6 (a) に示すようにプラス側の振幅とマイナス側の振幅が零クロス点で点対称となるべき交流波形がプラス側にシフトされている。



(a) 直流地絡発生時



(b) 直流地絡発生前

図2-6 直流電路で地絡が発生した場合の交流電路の対地電位

2.3 直流配電における電磁環境に起因した障害事例

本節では具体的な障害事例について述べる。はじめに、低周波領域の障害事例として、直流配電側地絡事故により交流配電側へ影響した二つの事例、変圧器の偏磁および漏電遮断器の不要動作について、次に高周波領域の障害事例として、電圧形インバータから発生した高周波電流の誘導による装置の誤動作、雷サージによる機器の絶縁破壊などについて説明する。

2.3.1 直流配電側地絡事故による交流配電側の機器への影響

直流配電において地絡事故が発生した場合、交流配電を含めて影響を及ぼす例がいくつか報告されている。例えば、地絡事故が発生すると対地電位が上昇する。この電位上昇が機器の絶縁破壊電圧を上回ると、絶縁破壊に至る。ここでは変圧器の偏磁、他系統漏電遮断器の不要動作について説明する。

(1) 変圧器の偏磁

交流配電に太陽光発電設備などの直流配電が接続される場合、直流の交流配電への流出防止が「系統連携ガイドライン」などで義務付けられている。直流の流出防止対策は、専用の変圧器を用いること、直流検出リレーを設置することなどがある。変圧器が専用であれば連係される他の交流配電への影響はないが、経済的に直流検出リレーが採用されることが多い。直流検出リレーは整定時間があり、リレーが直流を検出し遮断器等の事故電路を切離す装置が動作を完了するまでの数百ミリ秒の間、交流配電に影響を及ぼす。直流が交流配電へ流出し変圧器に流れると、偏磁が発生する。変圧器が偏磁すると励磁電流が増加し電圧の波形がひずむなどの問題が発生する。そのため機器の誤動作など多くの障害につながる。

(1) - 1 実験概要

変圧器の偏磁現象発生時における電源品質を明らかにするため、AC/DC コンバータなどの直流回路側で地絡事故が発生した場合を想定した実験システムを構築した。AC/DC コンバータ内部に絶縁変圧器を設置していない場合、直流回路側で地絡事故が発生すると、交流配電系統に直流電流が流れる。変圧器に直流電流が流れると偏磁が発生するため、その時の電圧・電流波形を測定した。

図 2-7 は、実験システムを示している。試験対象とした変圧器は、1 次側電圧が 210 V、2 次側電圧が 110 V、定格容量 5 kVA の単相変圧器で、1 次側と 2 次側は絶縁構造である。実際の電気設備において、単相 3 線式や三相 3 線式の変圧器などがあるが、今回は、変圧器に直流電圧を印加することで発生する事象を確認するので、単相変圧器で試験を実施した。試験用変圧器の 1 次側は、実験室内に設置されている試験用配電盤内部の交流の単相 210 V 回路に接続した。B 種接地抵抗は、45 Ω の抵抗素子とし、一端を試験対象となる変圧器の中性相 (N 相) に接続し、もう一端を接地端子に接続した。実際の B 種接地抵抗は、数 Ω 程度から数十 Ω と幅広いと想定される。しかしながら、変圧器やケーブルなどのインピーダンス (数 m Ω ~ 数十 m Ω) と

比較すると十分大きいと考えられる。このため、直流電圧印加時の電流を低く抑えるため、本実験では $45\ \Omega$ を選択し、実験で得られた結果により、可能であればいくつかの抵抗値を試すこととした。抵抗素子は、一方が試験用変圧器の中性相に接続し、もう一方は、接地端子に接続した。AC / DC コンバータは、直流電圧を出力する端子に断面積 $8\ \text{mm}^2$ の絶縁電線を接続し、変圧器の負荷側の P 相、もう一方は、絶縁電線を用いて接地端子に接続した。AC/DC コンバータの交流入力側は、試験用変圧器へ電源供給する実験室内の配電盤とは異なる配電盤から、単相 $110\ \text{V}$ を入力した。このため、試験用変圧器に供給される交流電源と、AC / DC コンバータに供給される交流電源は、上位の変圧器が異なっている。AC / DC コンバータは、インバータやコンバータの直流回路での地絡を想定したものである。

測定は、試験用変圧器の電源側の線間電圧と相電流、試験用変圧器の負荷側の線間電圧と相電流、抵抗素子の両端電圧と抵抗素子を流れる電流を、それぞれオシロスコープに入力した。図 2-7 の CT の矢印は電流の正方向である。試験方法は、試験用変圧器の電源側より交流電圧を印加した状態で、AC / DC コンバータより直流電圧を試験用変圧器の負荷側より印加した。直流電圧は、 $-100\ \text{V}$ から $+100\ \text{V}$ まで $10\ \text{V}$ ステップで印加した。

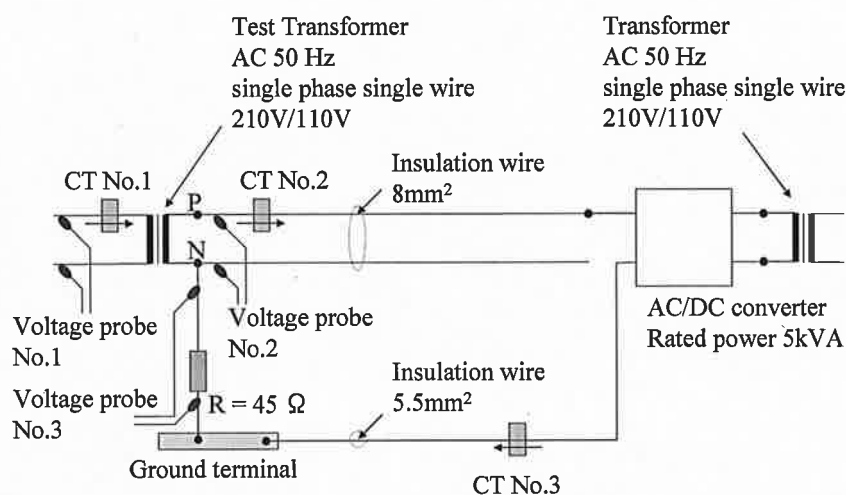
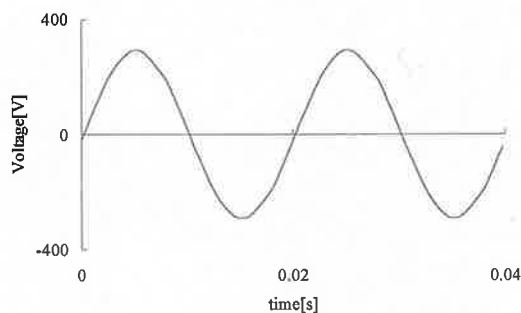


図 2-7 実験システム

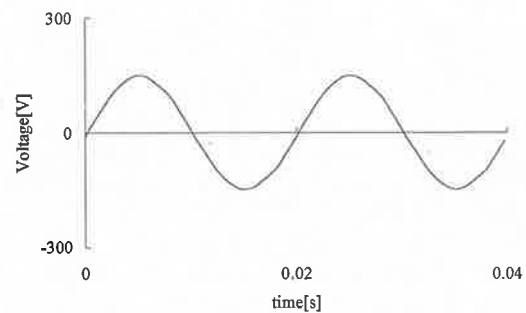
(1) - 2 直流電圧印加前の状態

図 2-8 および図 2-9 は、直流電圧印加前における電圧・電流波形である。図 2-8 (a) は、試験用変圧器の電源側の線間電圧で実効値 205.6 V、図 2-9 (a) は、試験用変圧器の電源側の相電流で実効値 1.53 A である。相電流がフラットカーブ状の波形となっているのは、変圧器の励磁電流に負荷電流が合成されているためである。図 2-8 (b) は、試験用変圧器の負荷側の線間電圧で実効値 104.6 V、図 2-9 (b) は、試験用変圧器の負荷側の相電流で実効値 2.31 A である。負荷側の電圧は、試験用変圧器の変圧比により、電源側電圧よりも小さくなっている。図 2-8 (c) は、抵抗素子の両端電圧で、試験用変圧器の負荷側の線間電圧とほぼ同程度となる実効値 104.4 V、そして、図 2-9 (c) は、抵抗素子に流れる電流で実効値 2.31 A である。AC/DC コンバータを接続することにより、AC/DC コンバータの内部抵抗が、電路と対地間に接続されることになるので、内部抵抗を介した回路が形成される。これにより、B 種接地抵抗を模擬している抵抗素子の両端に、試験用変圧器の負荷側の線間電圧とほぼ同程度の電圧が印加される。

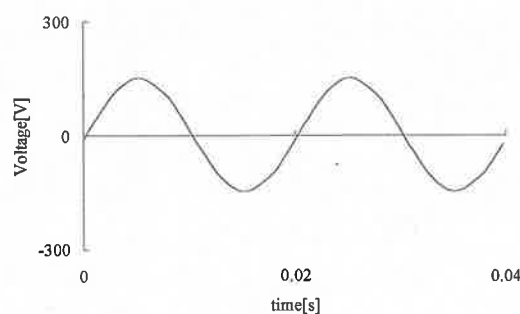
図 2-10 は、試験用変圧器の励磁電流である。これは、図 2-9 (a) の試験用変圧器の電源側の電流から、図 2-9 (b) の負荷側の電流を変圧器の変圧比を考慮し差し引いたものである。オー



(a) 変圧器 1 次側の電圧波形



(b) 変圧器 2 次側の電圧波形

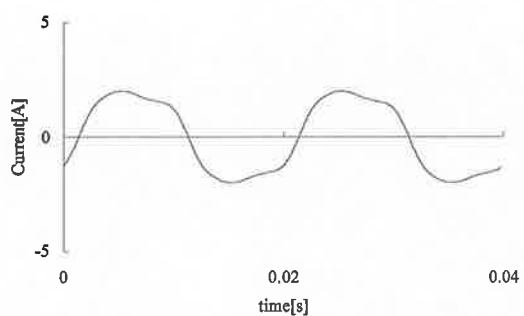


(c) 抵抗の両端電圧波形

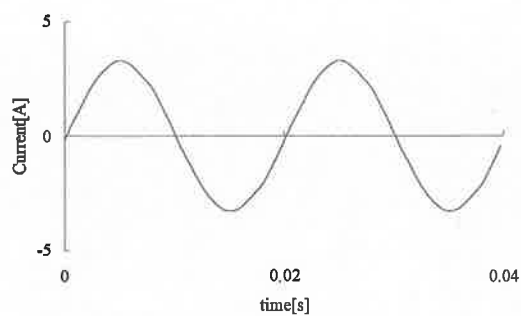
図 2 - 8 直流電圧印加前の電圧波形

バースイング状の波形となり，一般的に見られる励磁電流波形となっている。

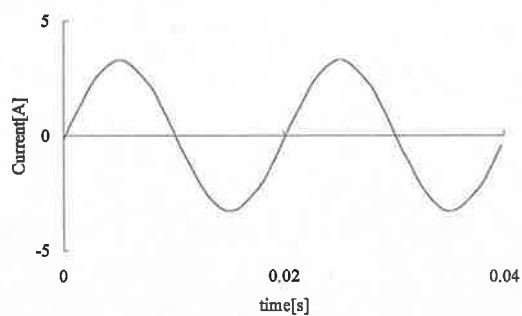
これを初期状態とし，次に AC/DC コンバータより直流電圧を発生させ，各測定箇所の電圧・電流の状況を確認した。



(a) 変圧器 1 次側の電流波形



(b) 変圧器 2 次側の電流波形



(c) 抵抗に流れる電流波形

図 2-9 直流電圧印加前の電流波形

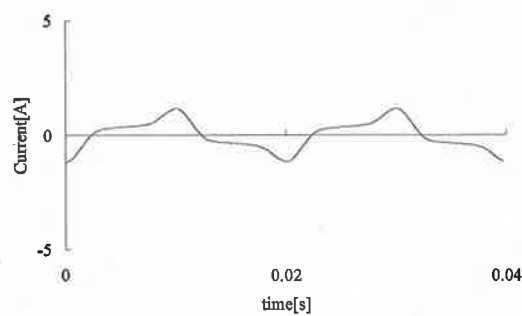
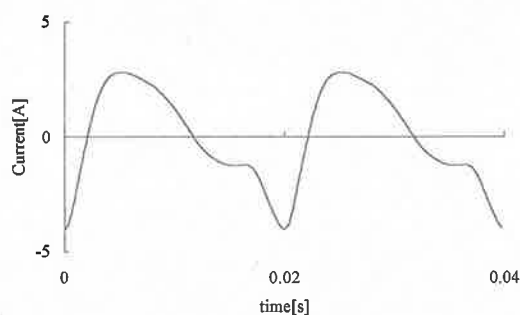


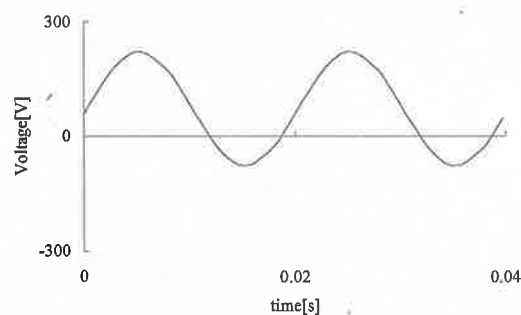
図 2-10 試験用変圧器の励磁電流

(1) - 3 直流電圧印加時の試験結果

図 2-11 は、P 相側に直流電圧 70 V を印加した時を示している。図 2-11 (a) は、変圧器の電源側の相電流で実効値 2.08 A となり、初期状態から増加している。また、プラス方向とマイナス方向の波形形状は、非対称となっている。図 2-11 (b) は、抵抗素子の両端電圧で、交流電圧の実効値 104.4 V に直流電圧 70 V が重畳している。このことから、抵抗素子には、交流電流の実効値 2.31 A と直流電流 1.6 A が流れていることになる。図 2-12 は、励磁電流である。励磁電流は、図 2-11 (a) の変圧器の電源側の相電流から、図 2-9 (b) の負荷側の電流を変圧器の変圧比を考慮し差し引いたものである。初期状態となる直流電圧印加前において、プラス方向とマイナス方向のオーバースイング状の波形形状は、零クロスで点対称であったが、P 相側に直流電圧を印加すると、プラス側のオーバースイング状の波形はなくなり、マイナス側に大きくオーバースイングしている。



(a) 変圧器 1 次側電流波形



(b) 抵抗の両端電圧

図 2 - 1 1 直流電圧印加時 (P 相側)

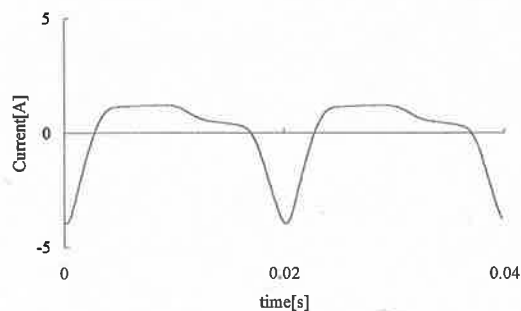
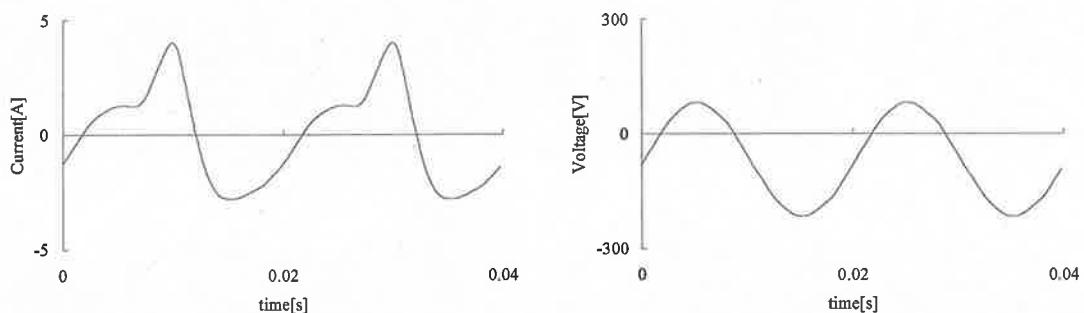


図 2 - 1 2 直流電圧印加時の試験用変圧器の励磁電流

図 2-13 は、接地端子側に直流電圧 70 V を印加した時を示している。図 2-13 (a) は、変圧器の電源側の相電流実効値 2.08 A となり、初期状態から増加している。また、プラス方向とマイナス方向の波形形状は、非対照となっている。図 2-13 (b) は、抵抗素子の両端電圧で先ほどと同様に、交流電圧の実効値 104.4 V に直流電圧 70 V が重畳している。このことから、抵抗素子には、交流電流の実効値 2.31 A と直流電流 1.6 A が流れていることになる。図 2-14 は、励磁電流である。励磁電流は、図 2-13 (a) の変圧器の電源側の相電流から、図 2-9 (b) 負荷側の電流を差し引いたものである。先ほどの P 相側に直流電圧を印加した時とは異なり、プラス側に大きくオーバースイングする波形となっている。



(a) 変圧器 1 次側電流波形

(b) 抵抗の両端電圧

図 2 - 1 3 直流電圧印加時 (N 相側)

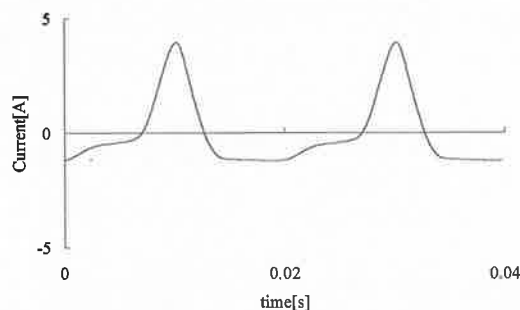


図 2 - 1 4 直流電圧印加時の試験用変圧器の励磁電流

(1) - 4 試験結果の考察

図 2-15 は、変圧器の負荷側に印加された直流電圧と、変圧器の電源側の相電流の関係を示している。横軸に直流電圧を 0 V を中心として -100 V から +100 V までとしているが、プラス方向は P 相側に直流電圧が印加された場合、マイナス方向は接地端子側に直流電圧が印加された場合を示している。直流電圧 0 V の時の相電流と比較して、直流電圧が増加すると印加される方向に関わらず、変圧器の電源側の相電流は増加する傾向を示している。このとき、変圧器の負荷側の相電流に変化が無いことから、変圧器の電源側の相電流の変化は、変圧器の励磁電流の増加によるものと判断できる。

本実験では、B 種接地抵抗を模擬する抵抗を 45 Ω としている。この値を小さくすることで、変圧器に印加される直流電圧や直流電流は増加する。しかしながら、これらを増加させると、変圧器が飽和し、負荷側電圧のひずみ率が拡大する恐れがある。また、直流電流の増加は、損失の増加にも繋がる。

直流配電が増加に比例し、直流側での地絡事故が増加すると考えられる。このため、事故箇所を適切な箇所で速やかに切離すための保護協調や、交流配電と直流配電が混在する電気設備において適切な接地方式を選択することが重要と考えられる。

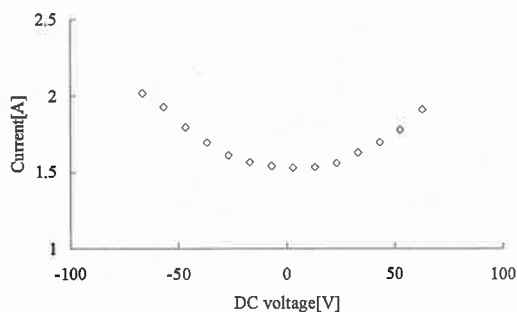


図 2 - 1 5 直流電圧印加時の試験用変圧器の励磁電流

(2) 他系統漏電遮断器の不要動作^[12]

(2) - 1 測定概要

図 2-15 に太陽光発電設備と不要動作した漏電遮断器の接続状況を示す。太陽光発電設備の構成は、同一変圧器からそれぞれ、No. 1 主幹漏電遮断器 (400 AF/250 AT, 漏洩電流の整定値 500/200/100 mA : 不動作領域 50 %以下, 事故発生時は 200 mA タップ, 動作時間 0.1 s : 不動作領域 50 %以下) および No. 2 主幹漏電遮断器 (仕様は No. 1 と同様) に接続されている。

主幹漏電遮断器 2 次側に分岐漏電遮断器 (50 AF/20 AT、漏洩電流の整定値 30 mA : 不動作領域 50 %以下, 動作時間 0.1 s : 不動作領域 50 %以下) が 15 回路設置されている。図中ではこのうち代表で 1 個の分岐漏電遮断器を示している。15 回路それぞれに 4 kW のトランスレス型パワーコンディショナ (以下, PCS) と太陽電池アレイ (以下, アレイ) が接続されている。漏電遮断器の不要動作が発生したのは, No. 1 主幹漏電遮断器である。

PCS の仕様は, 直流入力電圧 DC240 V, 定格容量 4 kW, 定格電流 20 A, 交流電圧範囲 AC202 V \pm 12 V である。PCS 内部には直流地絡電流検出用の電流センサ (± 100 mA、0.2 s 以内) が設置されている。

測定箇所は, 主幹漏電遮断器 2 次側の三相合成電流が 2 箇所 (以下, No. 1 主幹零相電流, No. 2 主幹零相電流, 図 2-15 では Main ZCT の箇所で No.1 のみ示している), 分岐漏電遮断器

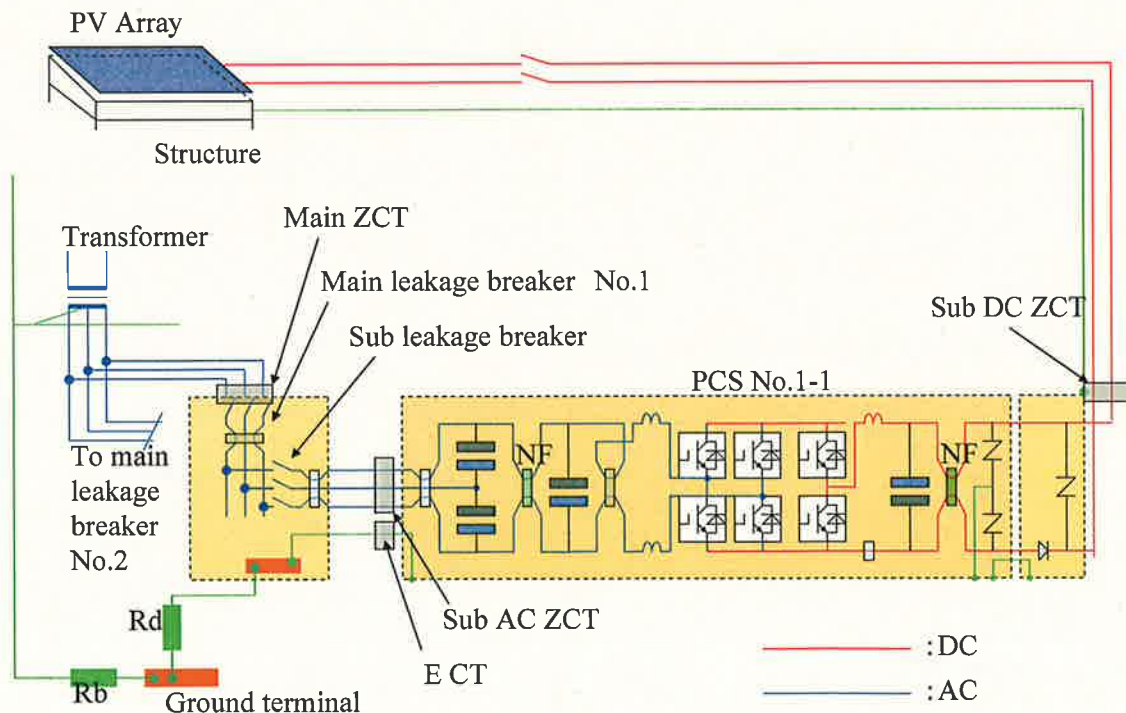


図 2 - 1 5 主要系統図と漏電遮断器動作箇所

2 次側の三相合成電流（以下、PCS 交流側零相電流、図 2-15 では Sub AC ZCT）が 3 系統（いずれも No. 1 主幹漏電遮断器から布設され、PCS No. 1-1、PCS No. 1-2、PCS No. 1-3 の 3 系統）とし、それぞれの PCS 直流側の二相合成電流（以下、PCS 直流側零相電流、図 2-15 では Sub DC ZCT）、PCS 用 D 種接地線電流（以下、PCS 接地線電流、図 2-15 では E CT）を測定した。

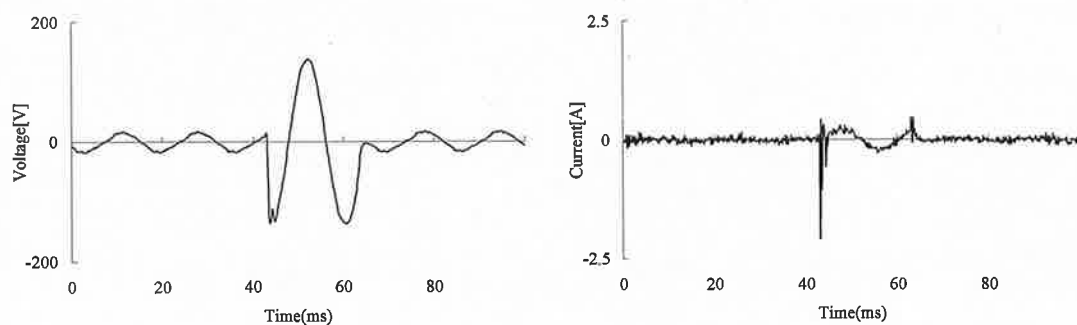
また、建物全体の漏電状況を確認するため、中性相とグラウンドターミナル間電圧（以下、N - G 間電圧）の計測を行った。太陽光発電設備を含めて建物内で地絡が発生すると、B 種接地線に電流が流れるので、B 種接地抵抗と地絡電流の積である N - G 間電圧が上昇する。このため、今回の測定対象以外で地絡事故が発生した場合の確認になるためである。測定器は日置電機製 3351 を用いた。電流クランプは、不要動作が交流用の漏電遮断器であったこともあり、交流用（周波数帯域：40 Hz～5 kHz）を採用した。

測定期間は 2009 年 8 月から 2013 年 10 月 31 日である。この間、様々なデータを得ることができた。得られたデータを整理すると、漏電遮断器の動作に関する事象をいくつかに分類できたが、2009 年 11 月 9 日に記録された測定結果を示す。

（２）－２ 測定結果

図 2-16 に N-G 間電圧と No. 1 主幹零相電流を示す。横軸は時間軸である。N-G 間電圧は定常的に初期値として実効値 12 V 程度を推移しているが、43 ms においてステップ状に立ち上がる波形が確認できた。このとき N-G 間電圧の最大値は瞬時値 136 V、実効値 96 V であった。この電圧は、20 ms 程度継続し、その後、初期値となる実効値 12 V に減少した。No. 1 主幹零相電流の最大値は、N-G 間電圧の最大値が記録されたのと同じ時間で瞬時値 2.08 A であった。その後、実効値 0.12 A 程度となり、約 20 ms 後の N-G 間電圧が減少するのと同じ時間でほぼ零となった。

図 2-17 に PCS No. 1-1 における AC 側零相電流、DC 側零相電流、接地線電流の測定結果を示す。AC 側零相電流の最大値は 0.21 A で、No.1 主幹零相電流の最大値と同様に N-G 間電圧の最

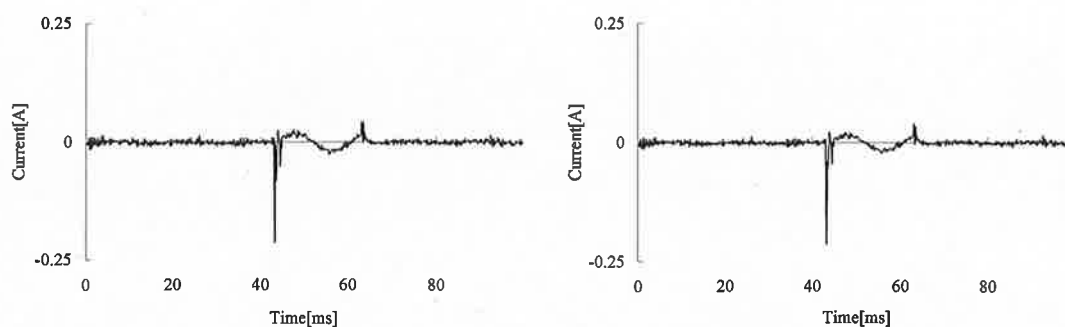


(a) N-G 間電圧

(b) No. 1 主幹零相電流

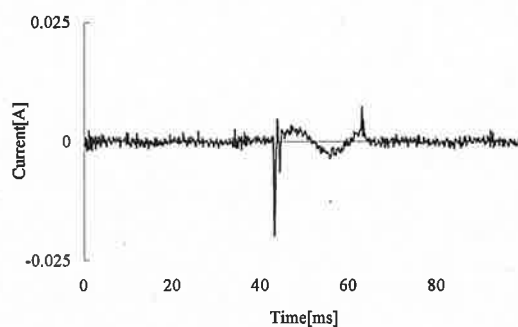
図 2 - 1 6 測定された N-G 間電圧と No. 1 主幹零相電流

大値と同じ時間に記録された。タイミングであった。その後、実効値 0.01 A 程度となり、先ほどの主幹零相電流と同様に、最大値を記録してから約 20 ms 後にほぼ零となった。DC 側零相電流、接地線電流も電流の大きさの違いはあるが同様の傾向を示した。



(a) AC 側零相電流

(b) DC 側零相電流



(c) 接地線電流

図 2-17 測定された PCS No. 1-1 におけるデータ

(2) - 3 測定結果の考察

図 2-16 より N - G 間電圧と No. 1 主幹零相電流の瞬時値がほぼ 90° の位相差があったため、記録された電流は、電路等の対地静電容量の充電電流であると判断し、漏電遮断器 2 次側以降の対地静電容量の算出を試みた。N - G 間電圧が実効値 96 V、No. 1 主幹零相電流が実効値 0.12 A であるので、No. 1 主幹漏電遮断器 2 次側の対地静電容量 $C_{No.1}$ は N - G 間電圧を V_{NG} 、No. 1 主幹零相電流を I_{01} とすると (2-1) 式で算出されと考えられる。また、PCS No. 1-1 の DC 側主幹零相電流は実効値 0.01 A であるので、この零相電流を I_{01-1} とすると同様に $C_{No.1-1DC}$ は (2-2) 式で算出されと考えられる。

$$C_{No.1} = \frac{I_{01}}{\omega \times V_{NG}} = \frac{0.12}{2\pi \times 50 \times 96} = 3.98 \mu F \quad (2-1)$$

$$C_{No.1-1DC} = \frac{I_{01-1}}{\omega \times V_{NG}} = \frac{0.01}{2\pi \times 50 \times 96} = 0.33 \mu F \quad (2-2)$$

PCS No. 1-1 の DC 側の配線は、架橋ポリエチレンで絶縁された CV ケーブルと呼ばれるもので、サイズは 3.5 mm^2 、心線数は 2、線路長 200 m 程度である。このケーブルの標準的な対地静電容量は、 0.25 nF/m であるので、ケーブルだけの対地静電容量 C_{cable} は $0.05 \mu F$ となる。以上から、PCS No. 1-1 に設置されているアレイの対地静電容量 C_{array} は $0.29 \mu F$ と推定される。

今回、測定された主幹零相電流や、AC 側零相電流及び DC 側零相電流は、アレイやケーブルの対地静電容量の充電電流であり、電気設備では必ず考慮しなければならない。しかしながらこれまでこの充電電流を想定した地絡保護協調はされておらず、漏電遮断器が不要に動作する事例はなくなる。直流配電を含めた交流配電の地絡保護協調の検討が必要であると考えられる。

2.3.2 高周波ノイズによる誘導^[13]

最近の電気電子機器は、交流を一旦直流に変換し駆動するもの、その直流をさらに交流に変換し駆動するものが主流となっている。交流を直流に変換する装置はコンバータ、直流を交流に変換する装置はインバータと呼ばれるが、これらが実際に使用されている現場では、コンバータとインバータをまとめてインバータと呼ぶ場合もある。これらの装置は半導体を用いたスイッチングによりスイッチング周波数に起因した高周波電流がインバータから発生することは広く知られている。この高周波電流は、インバータ内のノイズフィルタなどを介して狭い範囲の閉回路内を還流すれば問題ないが、電気設備のB種接地極や、他の電路を介した閉回路内を還流した場合、様々な障害の要因となる。

(1) データ転送装置の不具合

(1) - 1 測定概要

図 2-18 に障害が発生した建物の電気設備の概要を示す。図中では省略されているが受電電圧 66 kV，特高変圧器 2 台にて 6 kV に降圧，高圧変圧器バンクは全部で 9 系統あり，そのうち，4 系統が三相 4 線式 415 V 電路となっており，図中でこのうちのひとつを記載している。負荷は，容量 1500 kVA でインバータ駆動する機器である。障害が発生したデータ転送装置は，単相

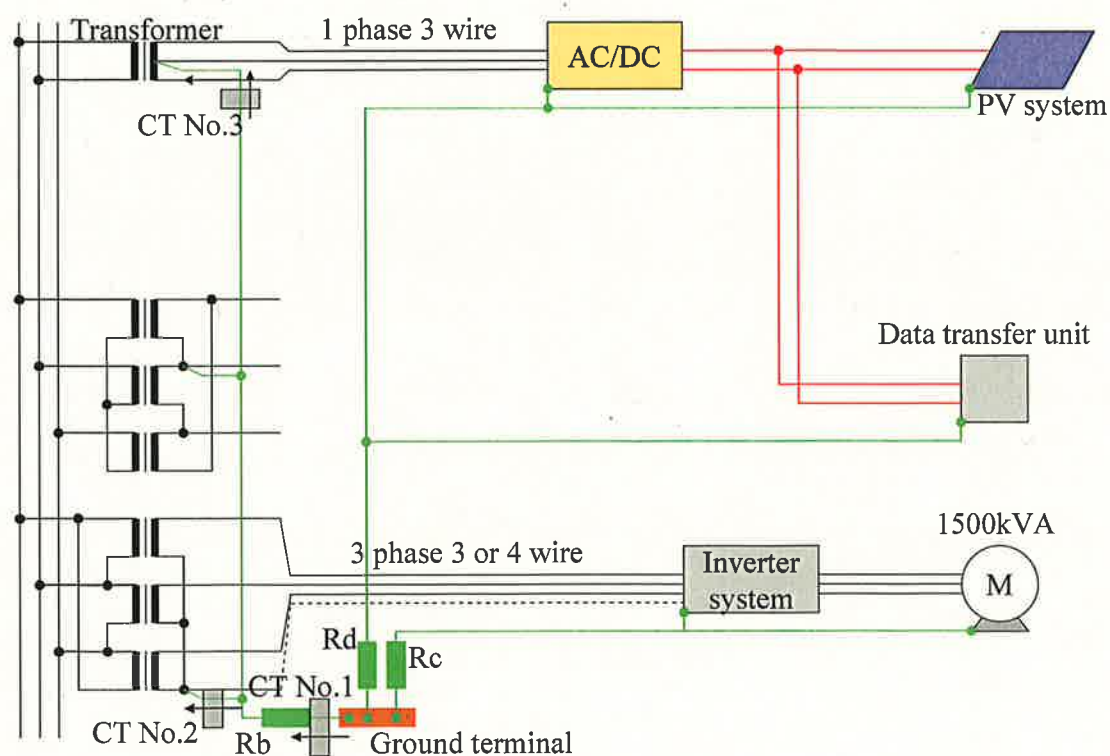


図 2 - 1 8 電気設備の概要

3 線式 210-105 V 電路から AC/DC コンバータを介して直流配電で電源供給を受けている。障害の内容は、大容量負荷が稼動するとデータ転送装置に通信エラーが発生するものであった。大容量負荷のインバータから発生する高周波電流による誘導障害が想定された。

接地系統について説明する。各変圧器の B 種接地工事は接地極が共通となっている。大型機械用の接地は C 種接地工事，データ転送装置用の接地は D 種接地工事と別々になっている。

当該施設の電源品質の調査を行った。測定はオシロスコープ（横河電機 DL1540）を用い，波形測定・周波数解析を行った。測定箇所は，各変圧器 B 種接地工事の接続点とグラウンドターミナル間（以下，N-G 間電圧），B 種接地線電流（図 2-18 で CT No.1），各変圧器の B 種接地線電流，大容量負荷系統の B 種接地線電流（図 2-18 で CT No.2），単相 3 線式電路の B 種接地線電流（図 2-18 で CT No.3）とした。

（１）－２ 測定結果

① N-G 間電圧と大容量負荷を接続した変圧器の B 種接地線電流

図 2-19 に中性相と対地間電圧（以下，N-G 間電圧）および大容量負荷を接続した変圧器の B 種接地線電流の波形を示す。図 2-19 の左側は 2 ms/div，右側は 200 μ s/div である。N-G 間電圧，大容量負荷を接続した変圧器の B 種接地線電流ともに周波数の主成分は，図 2-19 (a) より 150 Hz，図 2-19 (b) より 10 kHz であった。N-G 間電圧は実効値 14.95 V，P-P 値 62.40 V、周波数解析の結果，150 Hz 成分の電流値は 1.161 A（瞬時値）であった。B 種接地線電流は，最大で 5 A となり，電流クランプ読取值で 1 A～5 A の間を変動していた。

② 大容量負荷を接続した変圧器の B 種接地線電流と B 種接地線電流

図 2-20 に大容量負荷を接続した変圧器の B 種接地線電流と単相 3 線式電路の B 種接地線電流の測定結果を示す。図 2-19 と同一の縦軸レンジで比較した場合，大容量負荷が接続される変圧器の B 種接地線電流は，150 Hz と 10 kHz の周波数成分が含まれていたが，B 種接地線電流

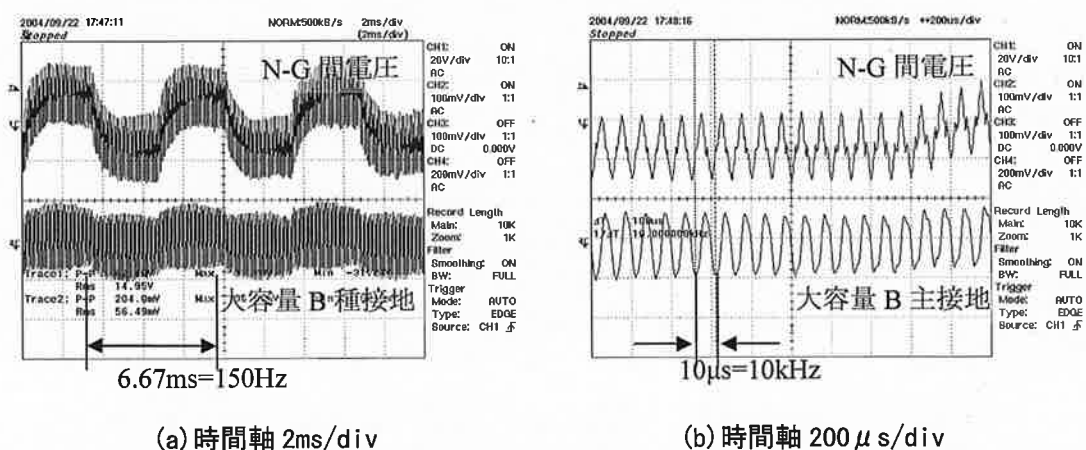
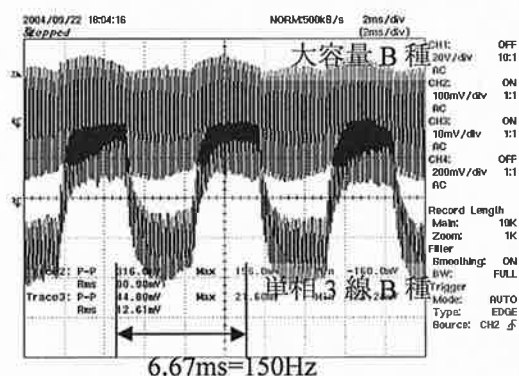


図 2－19 上段：N-G 間電圧，下段：大容量負荷を接続した変圧器の B 種接地線電流

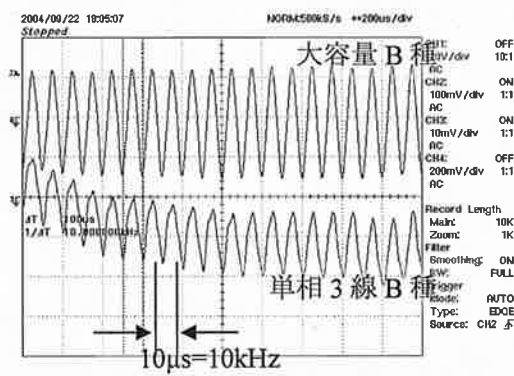
は、150 Hz 成分のみであった。B 種接地線電流のレンジを 10 倍に拡大すると 10 kHz の周波数成分が確認できた。B 種接地線電流の電流クランプ読取値は 1 A～5 A となり、大容量負荷を接続した変圧器 B 種接地線電流と同程度となった。

③ 大容量負荷を接続した変圧器の B 種接地線電流と、単相 3 線式変圧器の B 種接地線電流

図 2-21 に測定結果を示す。単相三線式変圧器の B 種接地線電流は、周波数成分 10 kHz が含有されていた。更に、大容量負荷を接続した変圧器の B 種接地線電流と単相 3 線式変圧器の B 種接地線電流の位相は、反転していた。

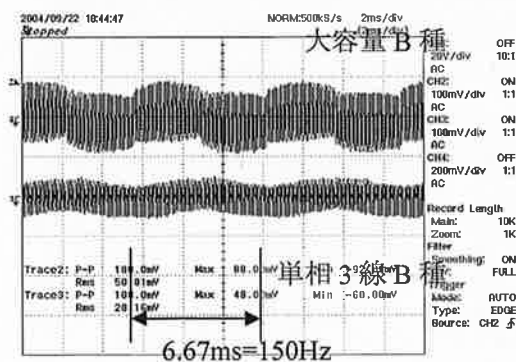


(a) 時間軸 2ms/div

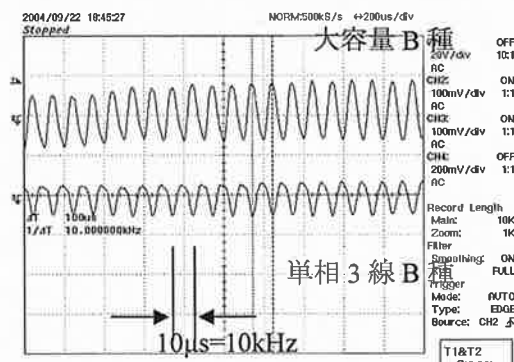


(b) 時間軸 200 μs/div

図 2-20 上段：大容量負荷を接続した変圧器の B 種接地線電流，下段：B 種接地線電流



(a) 時間軸 2ms/div



(b) 時間軸 200 μs/div

図 2-21 上段：大容量負荷を接続した変圧器の B 種接地線電流
下段：単相 3 線式変圧器の B 種接地線電流

(1) - 3 測定結果の考察

図 2-22 に測定結果から考えられる電流の流れを示す。10 kHz を主成分とする高周波電流は、大容量負荷の稼動停止に伴い発生していることから、大容量負荷を稼動させているインバータから発生していると判断できる。この高周波電流がデータ転送装置のノイズフィルタ、ケーブルの対地静電容量を介して、単相 3 線式電路に流入したため、障害が発生したものと推定される。

ここでの接地方式は TT 接地方式と言われるものである。接地方式は大きく 3 つに分類されるが、接地方式の違いによる高周波電流の流れに明らかにされた例はなく、この検討が十分でないと、高周波電流による障害が発生する恐れがある。

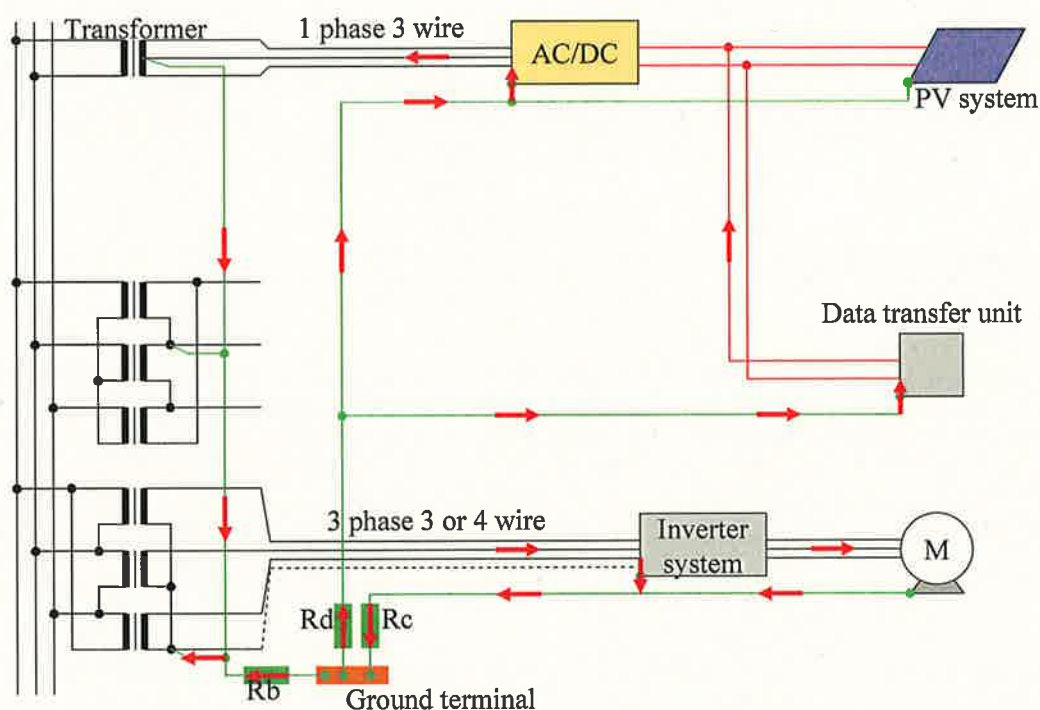


図 2 - 2 2 150Hz と 10kHz 成分の電流の流れ

(2) 蓄電池設備監視装置の不具合^[14]

(2) - 1 測定概要

図 2-23 に電気設備の概要を示す。交流をコンバータにより直流に変換し、バッテリーユニットに直流配電されている。バッテリーユニットはブレーカユニット、メイン及びサブユニットで構成される。メインバッテリーユニットにはバッテリーコントローラが設置され、バッテリーの充放電制御や状態信号を外部に送信している。当該設備が運用を開始し、まもなく外部との通信ができなくなる障害が発生した。コンバータの高周波電流の影響を確認するため、直流配電側の負荷電流、零相電流、接地線電流、および DC 配電側の対地間電圧を測定した。電流の計測には日置電機製 DC クランプ 3274 (DC~10 MHz, 150 Arms), 電圧計測には横河電機製電圧プローブ 700925 (DC~15 MHz) を用い横河電気製オシロスコープ DL9000 に入力した。

(2) - 2 測定結果

図 2-24 に直流配電正極と対地間電圧波形, 図 2-25 に直流配電の零相電流波形を示す。対地間電圧波形は, 図 2-24 (a) から 150 Hz, 図 2-24 (b) から 3.5 kHz の高周波電流が重畳していることが確認できた。零相電流は高周波電流が主成分となっているが, 360 Hz で間欠的に電流の振幅が変化することが確認できた。図 2-26 に直流配電正極と対地間電圧および直流配電の

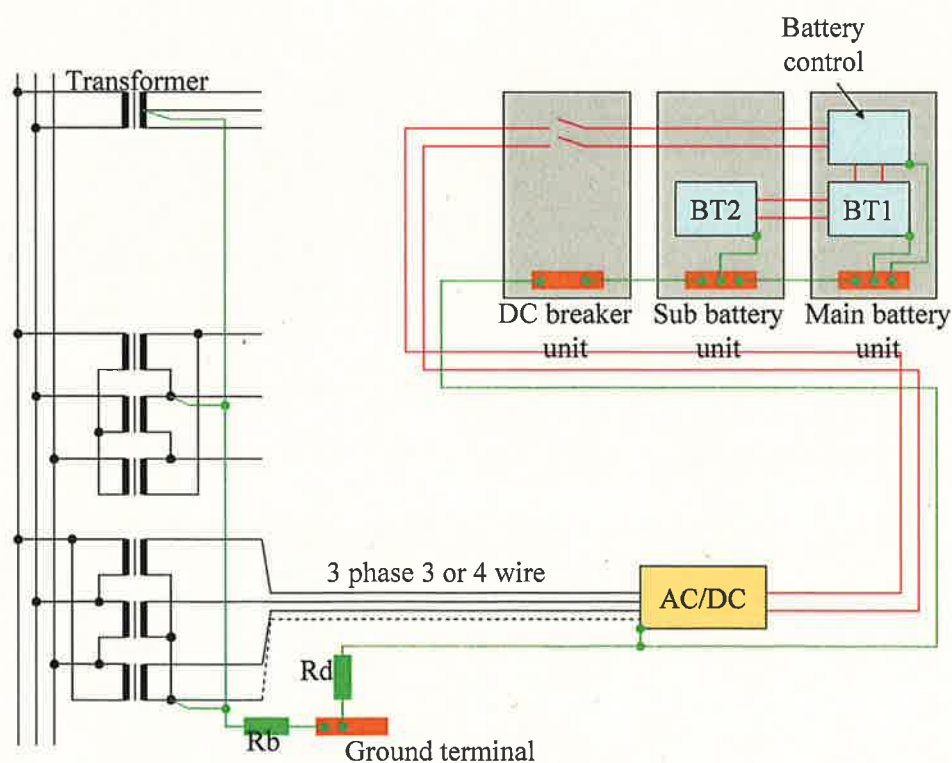
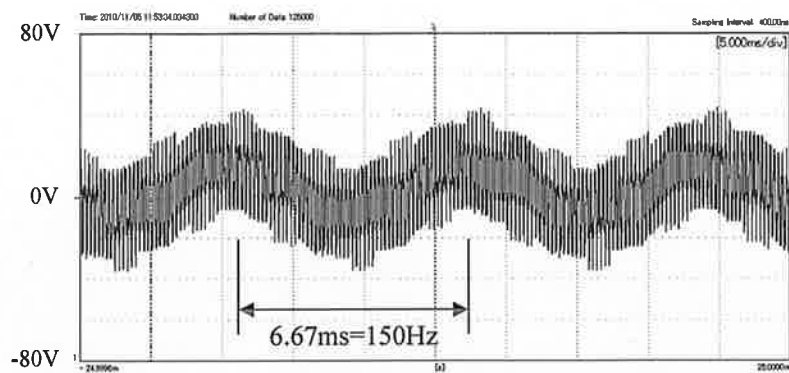
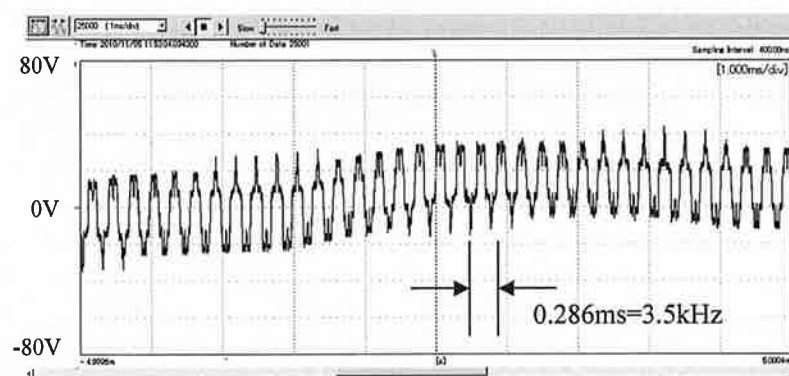


図 2 - 2 3 電気設備の概要

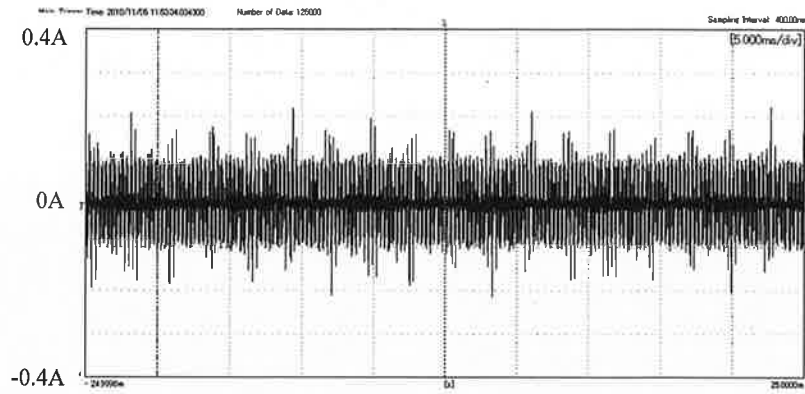


(a) 時間軸 5ms/div

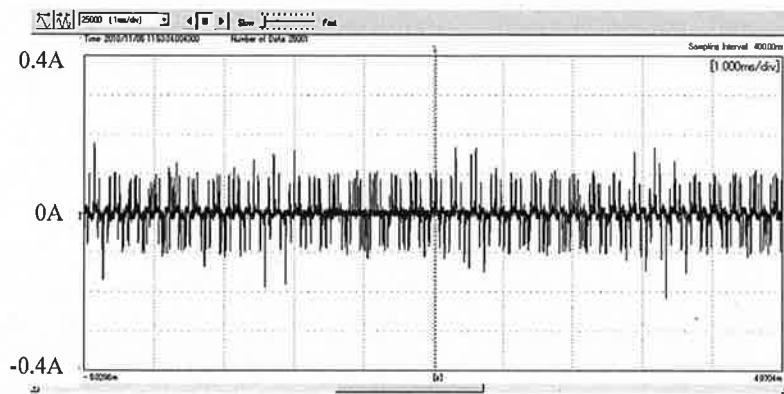


(b) 時間軸 1ms/div

図 2-24 正極と対地間電圧



(a) 時間軸 5ms/div



(b) 時間軸 1ms/div

図 2 - 2 5 直流配電の零相電流

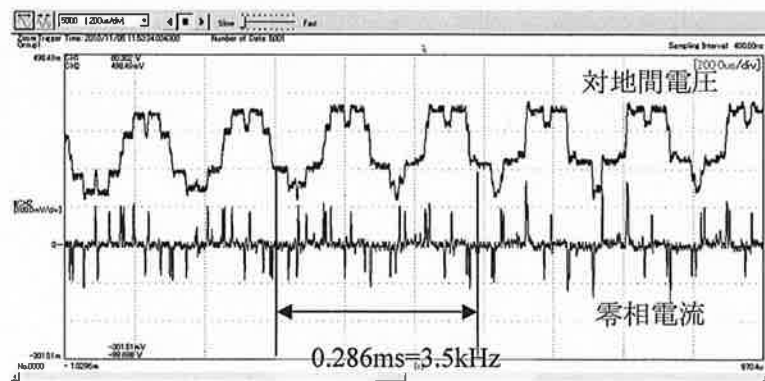
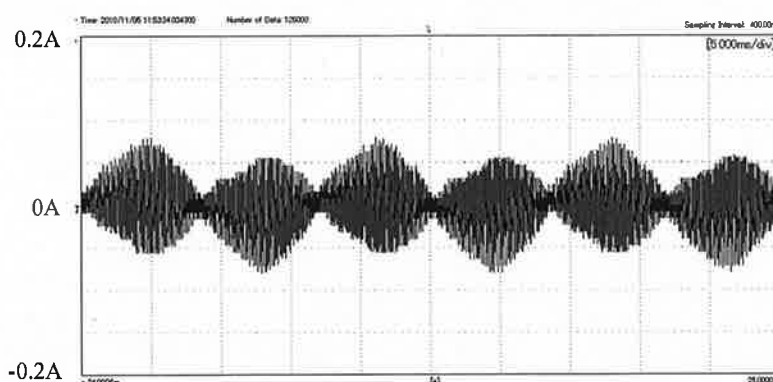


図 2 - 2 6 対地間電圧と零相電流

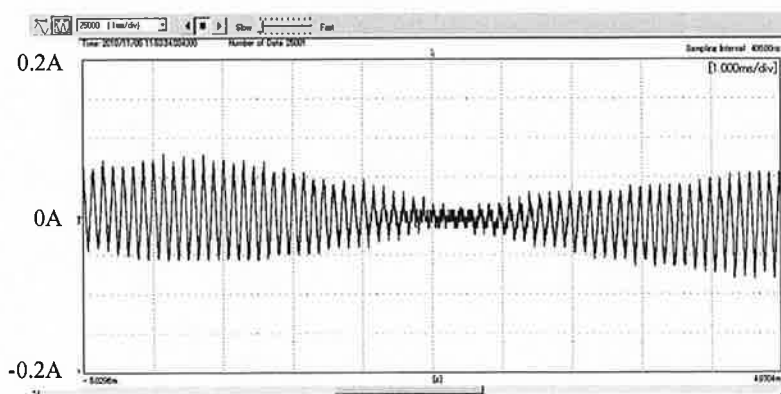
零相電流を示す。対地間電圧は、特徴的なステップ状の変化をした。これに対し、直流配電の零相電流は、対地間電圧のステップ状の変化に伴い、スパイク状の電流波形となった。図 2-27 に DC ブレーカユニットとサブバッテリーユニットを接続する接地線の電流波形を示す。接地線電流は直流配電の零相電流の波形とは異なる変化をしていた。接地線電流は二つの周波数が混在するときに見られる特徴的な波形となった。図 2-28 に対地間電圧と接地線電流を示す。接地線電流は、零相電圧の 3.5kHz の周波数に対し 2 倍の 7kHz の周波数を持つことが確認できた。

(2) - 3 測定結果の考察

直流配電の零相電流は、コンバータのスイッチングにより発生する高周波電流であると考えられる。この零相電流は、バッテリーマネジメントシステムの電路にノイズフィルタなどの対地間と接続される回路が無いことから、バッテリーとケース間で形成される対地静電容量によって流れていると推定できる。更に、零相電流と接地線電流は電気回路的に一致するべきであると考えられるが、この違いは、バッテリーユニットから構造体へ流れているためであると考えら



(a) 時間軸 5ms/div



(b) 時間軸 1ms/div

図 2 - 2 7 DC ブレーカユニットとサブバッテリーユニットを接続する接地線電流

れる。図 2-26 より電圧の変化と静電容量の積が電流であることから、電流振幅の最大値が 10 A、電圧の時間変化率が 10 V/10 μ s とすると蓄電設備全体の対地静電容量は 10 μ F となると推測できる。

機器の対地静電容量についての調査不足や接地方式に対する検討不足があると高周波電流による障害が発生する恐れがある。

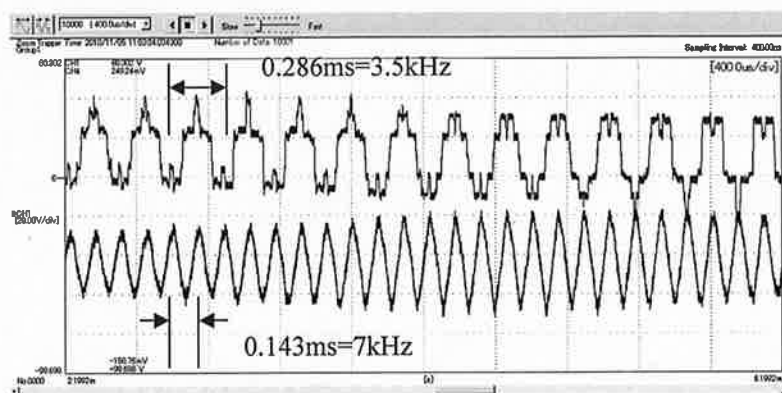


図 2-28 対地間電圧と接地線電流

2.3.3 雷サージによる絶縁破壊^[15]

(1) 変圧器の巻線短絡

(1) - 1 解析概要

図2-29に電気設備の概要を示す。受電点に雷サージ抑制のための避雷器が設置されていたが、送電線落雷時、変圧器内部コイルにおいて地絡事故が発生した。一般的に避雷器が設置されることで雷事故から保護されるが、避雷器設置点と機器が設置される場所の距離があるとサージの往復反射により、反射点においてサージが拡大する。この現象を検討するため過渡現象解析プログラムである EMTP (Electro Magnetic Transient Program) を用いて解析を行った。解析では標準波 $1/70 \mu\text{s}$ 12 kA を鉄塔モデルの頭頂部より注入した^[16]。

(1) - 2 解析結果

①標準波印加時の変圧器端子電圧

図 2-30 に鉄塔への雷撃時に発生する過電圧の解析結果を示す。図 2-30 (a) は受電点、図 2-30 (b) は変圧器 1 次側の解析結果である。鉄塔への雷撃時、受電点における電圧ピーク値は 290 kV、変圧器 1 次側では電圧ピーク値 322 kV になった。電圧ピークとなる時間は、受電点は $1 \mu\text{s}$ 、変圧器 1 次側では $4 \mu\text{s}$ となった。

②変圧器の巻線内部に発生する電圧

図 2-31 に変圧器巻線内部で発生する電圧の解析結果を示す。図 2-31 (a) は中間部の巻線間、図 2-31 (b) は中性点側の巻線間で発生した電圧である。中間部における最大値は変圧器に雷サージが印加されると、538 kV まで上昇した。さらに、中性点に地絡事故が発生したことを想定し、中性点の電位急落が発生した場合、中間巻線間に 83 kV の電位が発生した。

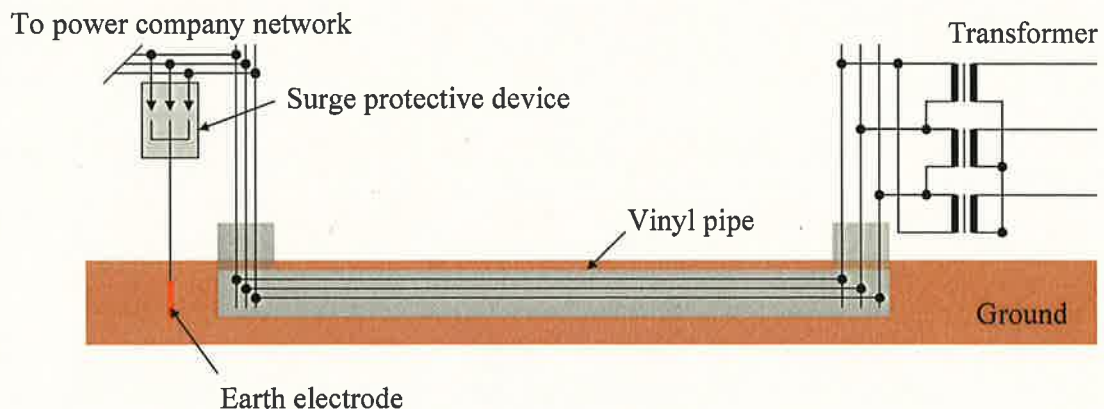
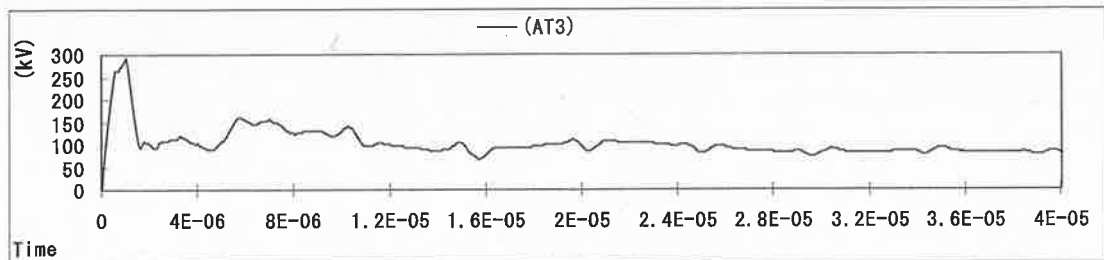


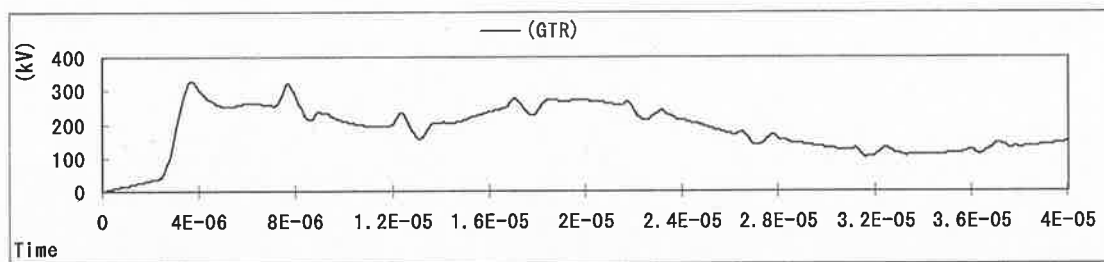
図 2 - 2 9 電気設備概要

(1) - 3 解析結果の検討

中性点の設計絶縁強度は 471 kV であるので、解析結果の 538 kV はこれを上回っており、絶縁破壊に至る可能性がある。更に、絶縁破壊が発生し、中性点の電位急落が発生すると巻線間には 88 kV の電位が発生したが、この設計絶縁強度は 64 kV であるので巻線間のレアショートに至る。これらの解析結果は、当該変圧器の状況と一致する結果となった。

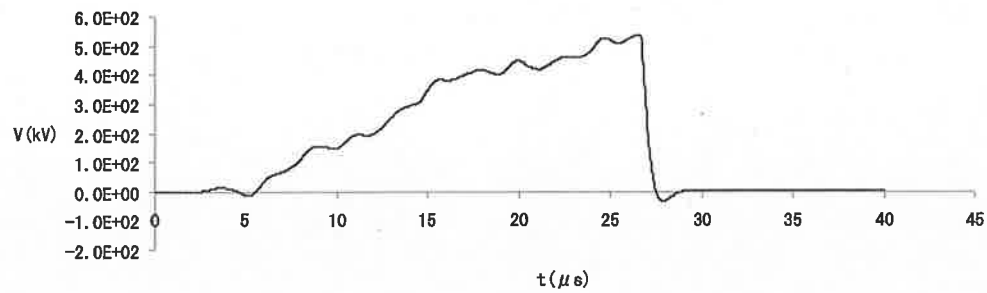


(a) 受電点



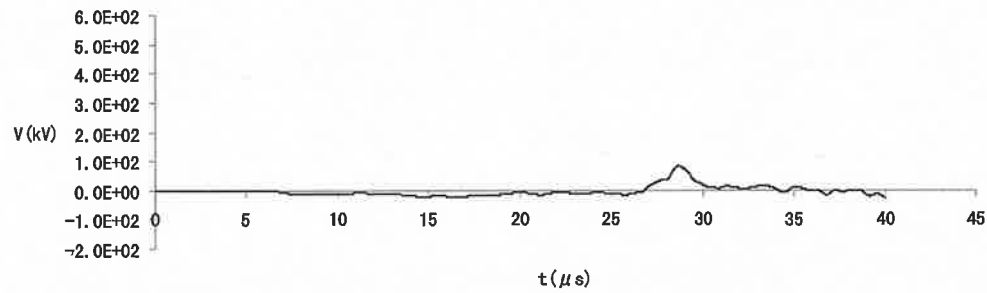
(b) 変圧器 1 次側

図 2 - 3 0 EMTP による解析結果



(最大: $5.3798E+02$ at $26.7 \mu s$, 最小: $-3.3591E+01$ at $27.8 \mu s$)

(a) 中間ターン数の巻線に発生した電圧



(最大: $8.3082E+01$ at $28.64 \mu s$, 最小: $-2.6317E+01$ at $40 \mu s$)

(b) 中性点に近い巻線間に発生した電圧

図 2-31 変圧器内部の解析

(2) 直流配電への誘導^[18]

(2) - 1 電気設備の概要

CGS 設備がある場合、商用電源の瞬時電圧低下などの事故時に、連係を高速（数 ms 程度）に切離す高速連係遮断装置が設置される。図 2-32 は電気設備概要を示している。この高速遮断器の制御回路には直流配電が用いられており、別の建物に設置されている蓄電池設備から高速遮断器の制御回路へ配線が布設されている。この連係用高速遮断器が送電線などへの落雷時に発生する瞬時電圧低下が発生していないにも関わらず動作した。図 2-33 は瞬時電圧低下時の電圧波形、図 2-34 は瞬時電圧低下発生時に記録された連係用高速遮断器の信号電圧である。瞬時電圧低下が発生すると図 2-33 に示すように電圧波形が自動記録される。瞬時電圧低下が発生すると、図 2-34 に示すように CH1 の遮断器開放指令信号が発生する（0 V から 100 V に変化）。ほぼ同時に CH2 の他遮断器への瞬低信号が発生し（0 V から 100 V に変化）、高速遮断器が開放されると CH5 が変化する（100 V から 0 V に変化）。商用電源に異常が発生し高速遮断器が開放されると、連係条件が不成立となるので CH4 が変化する（100 V から 0 V に変化）。

(2) - 2 測定結果

図 2-35 に高速遮断器が不要動作した際の記録を示す。CH6 から CH8 はそれぞれ三相の線間電圧を示しているが、瞬時電圧低下など電源品質に異常は確認できなかった。しかしながら、CH1 の遮断器開放指令信号に誘導電圧が発生し、高速遮断器が開放されたことを示す CH5 が変化した。

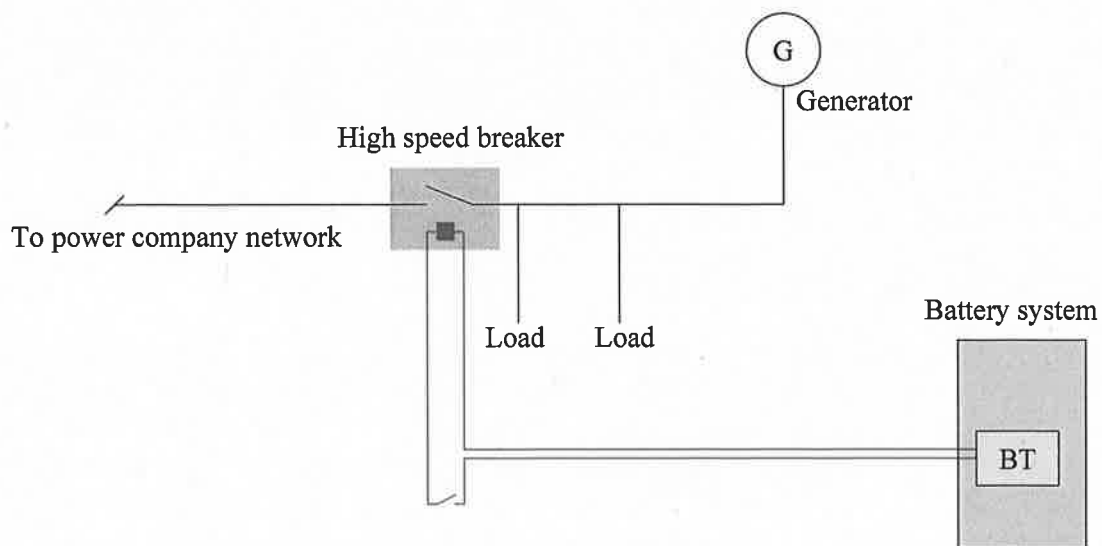


図 2 - 3 2 電気設備の概要

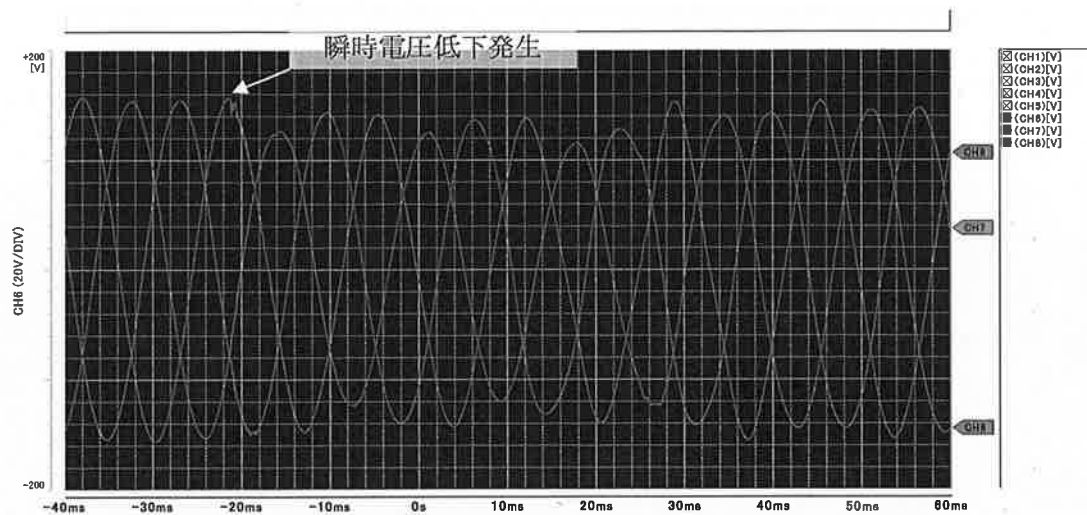


図 2-33 商用系統の瞬時電圧低下 -
CH6 : R-S 間電圧、CH7 : S-T 間電圧、CH8 : T-R 間電圧

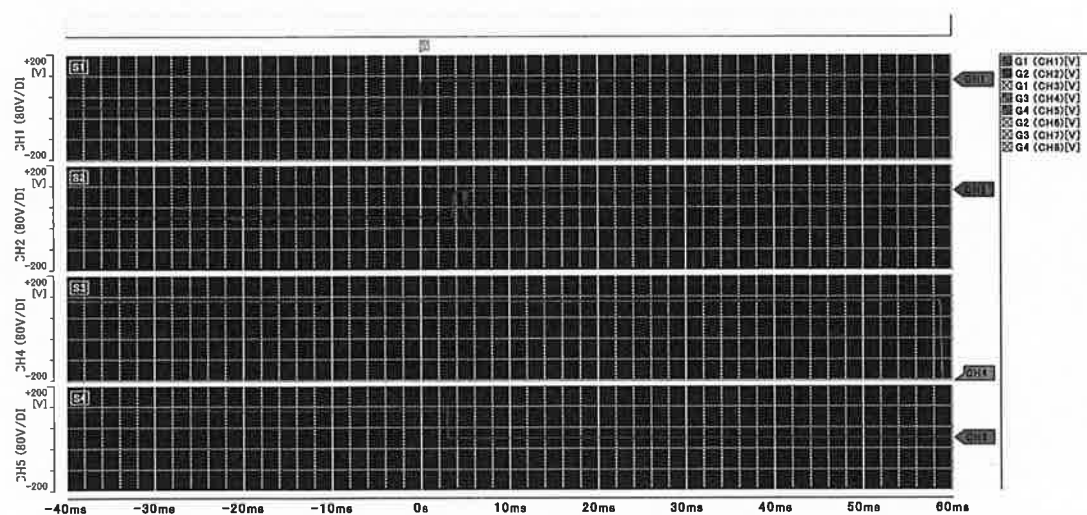


図 2-34 瞬時電圧低下発生時における高速遮断器の接点信号

- CH1 : 高速遮断器開放用接点 開放指令信号が発生すると DC100V
- CH2 : 27 警報用接点 瞬時電圧低下が発生すると DC100V
- CH4 : 系統連係中条件成立 系統連携条件が成立していると DC100V
- CH5 : 高速遮断器 52B2 開 高速遮断器が閉じていれば DC100V で、開放すると 0V

(2) - 3 考察

測定データが得られた時間帯の調査をした結果、近傍で落雷があったことが確認できた。近傍落雷により、直流配線に電圧が誘導し誤信号が入ったため高速遮断器の不要動作に至ったものと推測できる。

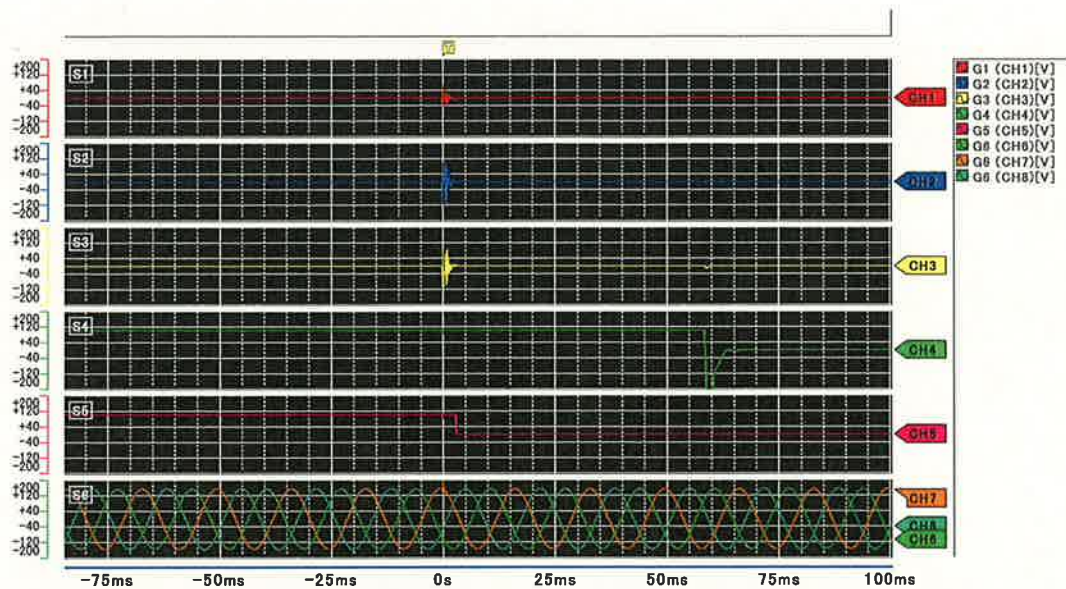


図 2 - 3 5 直流配線への誘導電圧の発生

CH1：高速遮断器開放用接点 開放指令信号が発生すると DC100V

CH2：27 警報用接点 瞬時電圧低下が発生すると DC100V

CH3：CH1 の予備信号

CH4：系統連係中条件成立 系統連携条件が成立していると DC100V

CH5：高速遮断器 52B2 開 高速遮断器が閉じていれば DC100V で、開放すると 0V

CH6：R-S 間電圧，CH7：S-T 間電圧，CH8：T-R 間電圧

2.4 まとめ

第2章では、直流配電に関連する障害事例についていくつか代表的なものを示した。直流配電は電源供給だけでなく、制御回路や情報通信回路など、建物内において様々な形で用いられている。直流を供給する電源も太陽光発電設備や蓄電池設備などの独立した電源だけでなく、交流を用いて直流に変換する場合もある。また、直流配電の接地は単独で設置されるわけではなく、交流配電に用いられる接地設備を共用する。このため、直流配電への電磁ノイズの侵入ルートは多岐に渡る。このようなことから、一度、障害が発生すると、調査箇所も多くなり、原因究明には時間を要する。需要家にとっても設備や機器の停止時間が長引けば多大な損害を受けることになる。電磁環境についての障害が発生する前に電気設備を適切に設計し障害を防止することは、設備を提供する電気設備設計者や工事業者だけでなく、提供される需要家にとっても重要なことである。

2.2節や2.3節の障害事例やこれまでに筆者が経験した他事例を整理すると、直流配電の電磁環境に起因する障害は、①地絡電流（商用周波数成分の零相電流）、②高周波電流、③サージ電圧、この三つに原因が絞られる。いずれも「接地」を介した現象であり、安定しかつ品質の高い電磁環境を提供・維持していくために、「接地」について研究し、その特徴を定性的・定量的に捉えることが重要であるといえる。筆者は、「接地」について検討を進める上で、

- ・保護協調の最適値
- ・「接地」方式の違いと電磁環境の定性的・定量的把握

この二つに着目した。地絡保護については、協調が適切でなければならないが、これには電気設備の回路インピーダンス、特に地絡保護を検討する場合には電路と対地間の回路条件が重要となる。接地方式については、現在、提案されているいくつかの接地方式について、高周波電流や雷サージの特徴を明らかにする必要がある。

本論文では、以降の章において、地絡保護協調、接地方式の違いによる高周波電流の流れ方、雷サージの発生の違いについて実験的に検討を行い、最適な方法について述べる。

第3章 直流配電の低周波領域におけるEMCに関する実験的検討

3.1 まえがき

太陽光発電設備は電路の絶縁低下や地絡などの事故時に流れる電流を検出するため、PCS の直流電路に直流地絡継電器、交流電路に交流地絡継電器や漏電遮断器が設置される。地絡事故を検出する機器は動作協調が図られているため、地絡事故点よりも電源側の直近上位に設置されている漏電遮断器の動作が最も早く設定され、速やかに地絡事故点を電路から切離すシステム設計が施されている。これは地絡保護協調と呼ばれ、電気設備を構築する上で安全上からも重要である。モジュールの絶縁不良による地絡事故や^[19]、太陽光発電設備以外の交流・直流配電での絶縁不良による地絡事故により、本来であれば直流地絡継電器が動作し速やかに直流配電側の地絡事故点を電路から切離す。しかしながら、PCS の交流配電側に設置される漏電遮断器の不要動作事例^[20]や、太陽光発電設備が接続されている変圧器とは別の変圧器から電源供給されている系統の漏電遮断器が不要動作する事例が報告されている。絶縁が良好な電路に設置されている漏電遮断器などの不要動作は、需要家内の停電範囲の拡大を招くため深刻な問題である。今後、太陽光発電設備は、社会的な背景もあり更に増加すると予想され、同種の事故の増加が懸念されている。

太陽光発電設備における絶縁劣化に関する研究として、アレイやモジュールの絶縁劣化箇所を特定する方法に関する研究がある^{[21]~[24]}。しかしながら、絶縁劣化箇所を速やかに遮断するための地絡保護協調に関して検討された事例は少ない。地絡保護協調の設計手法には二つの問題点があると考えられる。一つは、地絡継電器や漏電遮断器の動作整定が電気設備管理者の経験則に基づいているため、整定された値が最適であるかの判断ができないこと、もう一つは、漏電遮断器の不要動作を防止する対策は絶縁変圧器を設置することであるが、絶縁変圧器の要否を判断する基準がないことである。

これら二つの課題を解決するためには、交流電路と直流電路を構成する機器や材料のインピーダンスを明らかにしなければならない。機器や材料のインピーダンスが明らかになれば、需要家全体の回路モデルを考えることができ、事故電流を計算で求めることが可能になる。地絡保護協調を検討する場合の回路モデルにおいて必要な要素は、電路と接地点との間の対地インピーダンスである。電路には変圧器、電線・ケーブル、モジュールやPCSなどの各種電気機器が接続されている。この中で、対地インピーダンスを構成する要素は、B 種接地工事などの接地抵抗および接地抵抗と電路を接続する接地線、電気機器に内蔵されているノイズフィルタのキャパシタンス、電路の絶縁材料が誘電体となる対地静電容量である。

電線・ケーブルは数 pF / m から数十 pF / m の対地静電容量であるが、一つの需要家において電線・ケーブルの総延長距離は、数十 km に及ぶこともある。このため電線・ケーブルの対地静電容量は μF オーダーとなり、地絡電流の計算において考慮しなければならないと考えら

れる。モジュールはセルを絶縁体で封止しているため静電容量をもつ。モジュール単体の静電容量は地絡電流の計算に大きく影響を与えるものではないと想定できるが、アレイとしてモジュールの集合体を構成する場合は考慮する必要がある。これらの対地静電容量を考慮せず漏電遮断器の整定値を決定すると漏電遮断器の不要動作を招く恐れがある。

本章では単結晶や多結晶などのセルの種類に注目し、その対地静電容量を実測した。その結果、モジュールの種類には無関係で、裏面保護材（以下、バックシート）の違いによる差が確認できた。バックシートにはアルミとポリエチレンテレフタレート（以下、PET）が積層（以下、アルミシート）されたものやPET単体のものが用いられている。バックシートにアルミシートを用いたモジュールの対地静電容量は、PET単体を用いたものと比較し大きくなる傾向があり、その面積と断面高さの関係がある一定値以上であれば、従来の平行板の静電容量を求める式が有効であることを明らかにした。

さらに、バックシートにアルミシートを用いたモジュールの静電容量を算出する式を用いて、対地静電容量を考慮した漏電遮断器の適切な動作整定条件を算出する方法を明らかにし、実際の需要家設備に適用し有効な結果が得られた。

3.2 直流配電における保護協調

3.2.1 地絡時における太陽電池モジュールの影響

（１）太陽電池モジュールにおける対地静電容量の測定

モジュールの仕様は出力動作電圧や出力動作電流などが明らかにされているが、内部インピーダンスや対地静電容量は公表されていない場合が多い。モジュールの対地静電容量が公表されている例として松野氏^[25]の報告がある。しかしながら、測定方法が明らかにされていない。桜井氏ら^[26]は単結晶のモジュールに直流電圧を印加し、電圧・電流の時間的変化から静電容量を求めている。

ここでは、セルの種類と地絡事故時の事故電流の周波数範囲に着目し、静電容量を実測した結果を示す。モジュールは国内で市販されている単結晶・多結晶・薄膜結晶・アモルファス・CIGS（Copper Indium Gallium Diselenide）を対象とし、選定した国内 8 メーカー 18 機種を表 3-1 に示す。図 3-1(a)に測定の概要、同図(b)に測定部分の拡大を示す。測定器はアジレントテクノロジー社製インピーダンスアナライザ 4284A を用いた。本測定器は測定方法に自動平衡ブリッジ法を採用しており^[27]、広い周波数範囲を精度良く測定できること、および測定対象が片側接地されていても測定可能なことから回路素子のインピーダンス測定に広く採用されている。測定周波数範囲は 10 Hz～500 kHz としたが、これは地絡事故時に発生する事故電流が、商用周波数から半導体電力変換装置のスイッチングに伴う高周波電流まで含む場合があるためであり、需要家全体の回路モデルを想定する際に必要であると判断した。太陽電池モジュールは、発電面を暗幕シートで覆い発電電圧を数 mV 程度に抑えた。高さ 0.9 m の木製の机の上にゴムシート

を敷き、ゴムシートの上に高さ 0.6 m のプラスチック製のケースを置き、ケースの上にモジュールを配置した。図 3-1(b)に示すように、測定対象回路は正極側とフレーム間および負極側とフレーム間とした。図 3-1(b)の左図は結晶系、右図は CIGS 系の断面図を示すが、どちらも基本的な構造は変わらず、セルとフレーム、もしくはバックシートとの間に平行板コンデンサが形成される。図 3-2 はモジュールの接続箱の一例である。モジュールの正極と負極間にはダイオードが接続されているが、測定する際はこれを外した状態とした。これは、地絡事故が発生しても、線間電圧は変化せず、地絡電流の計算において線間のインピーダンスは無視できるためである。

表 3-2 に測定周波数 50 Hz におけるモジュールの静電容量の測定結果を示す。本研究の測定周波数範囲である 10 Hz～500 kHz の測定結果に違いは見られなかった。そのため、以降は 50

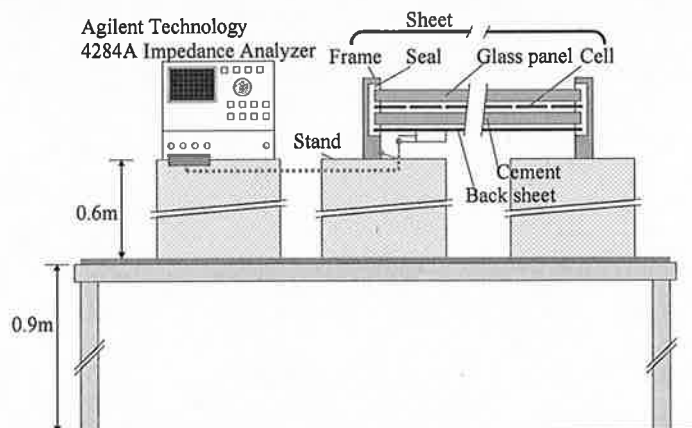
表 3－1 太陽電池モジュールの仕様

Maker	PV types	Power[W]	Width×Depth×Hight[mm]
A	Polycrystal	70	778*660*57
	Polycrystal	43	526*652*54
	Polycrystal	100	1300*540*36
B	Monocrystal	84	1200*530*35
	Monocrystal	130	1180*710*36
	Microcrystalline	128	1009*1419*46
C	Monocrystal	210	1580*812*35
	Polycrystal	208.4	1480*985*46
D	Polycrystal	230	1658*994*46
	Polycrystal	134	1230*790*36
	Polycrystal	134	1250*800*36
E	Microcrystalline	110	1240*1008*40
	Amorphous	60	960*990*40
F	CIGS	115	1417*791*37
	CIGS	125	1417*791*37
G	CIGS	85	1235*671*35
	Monocrystal	52.5	1290*330*36
H	Polycrystal	125	1160*800*36

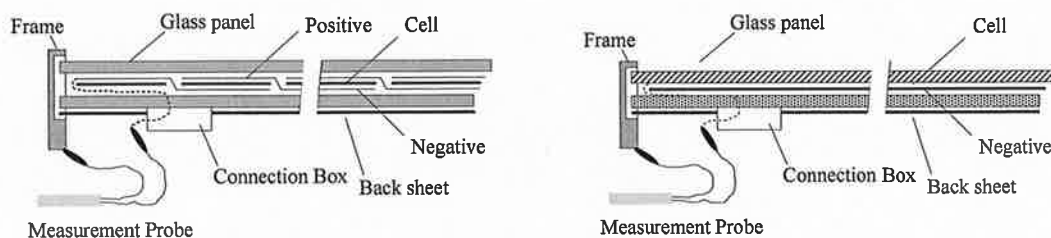
Hz に限定し議論する。また、正極側と負極側の測定結果についても当初の予想どおり違いが無かったため、ここでは負極側とフレーム間の測定結果を示している。

測定値は 0.2 nF～1.9 nF にばらついた。最大値は B 社の薄膜結晶で 1.9 nF、最小値は A 社の多結晶で 0.2 nF となった。

CIGS は F 社、G 社ともにほぼ同程度の値となった。多結晶は A 社の一部の機種が 1.5 nF となり、A 社の他機種や他メーカーの多結晶と比較し大きい傾向がある。単結晶は C 社の機種が 1.6



(a) 機器の配置



(b) 結晶系と CIGS 系の測定箇所

図 3-1 静電容量の測定



図 3-2 太陽電池モジュールの接続箱の例

nF となり、B 社と G 社の機種と比較し大きい傾向がある。E 社の 2 機種はそれぞれセルの種類が異なっているが、静電容量の測定値はほぼ同じ結果となった。

(2) 太陽電池モジュールの構造と対地静電容量算出式

静電容量は、電極面積と電極間の距離に関係する。従ってモジュールの構造と対地静電容量は一定の関係があると考えられる。モジュールの構造は、セルを EVA（エチレン酢酸ビニル）で封止しガラスパネルとバックシートで挟み込んでいる。モジュールは対地間に着目すると、配線とセルおよびフレームが電極となり、封止材・ガラスパネル・バックシートが誘電体となるコンデンサ構造を有していると考えられる。

バックシートは 2 種類あり、PET（ポリエチレンテレフタレート）を PVF（ポリフッ化ビニル）と EVA で挟み込んだもの、PET の代わりにアルミシートを用いた 2 種類がある。このため、

表 3-2 太陽電池モジュールの静電容量

Maker	PV types	Capacitance[nF]
A	Polycrystal	0.2
	Polycrystal	0.3
	Polycrystal	1.5
B	Monocrystal	0.4
	Monocrystal	0.7
	Microcrystalline	1.9
C	Monocrystal	1.6
	Polycrystal	0.4
D	Polycrystal	0.5
	Polycrystal	0.5
	Polycrystal	0.4
E	Microcrystalline	0.7
	Amorphous	0.6
F	CIGS	1.6
	CIGS	1.6
G	CIGS	1.5
	Monocrystal	0.7
H	Polycrystal	0.5

バックシートに PET とアルミシートを用いているモジュールの静電容量は、違いがあると推定できる。

バックシートにアルミを用いたモジュールの静電容量 C_{alm} は、配線とセルおよびアルミが電極となる平行板コンデンサ構造になると考えられる。モジュール面積を S [m²]、モジュール断面高さを d [m]、真空の誘電率 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ 、エチレン系の比誘電率 $\epsilon_s = 2.3$ とすると、バックシートにアルミを用いたモジュールの対地静電容量 C_{alm} は (3-1) 式となる。ここでモジュール断面高さとは、図 3-1 に示すセルからバックシートまで含めた厚さのことである。

$$C_{alm} = 20.36 \times 10^{-12} \frac{S}{d} \quad (3-1)$$

表 3-3 はバックシートにアルミを用いた 6 機種のモジュールの対地静電容量の測定値と、(3-1) 式で求められる計算値を比較したものである。誤差の最大値は、A 社の多結晶で 39.6 %、最小値は B 社の薄膜結晶で 0.5 %になる。

図 3-3 は横軸にモジュール面積と断面高さの比となる S/d をとり縦軸に対地静電容量の測定値と計算値の関係を示したものである。選定したモジュールにおいてモジュール面積と断面高さの比が 1500 以上の場合、よく一致している。 S/d が小さくなると誤差が大きくなる傾向がある。これはモジュールの面積が小さくなるか、断面高さが高くなると誤差が大きくなることを示している。これは、次のように考えることができる。モジュール面積が大きい場合、大部分は一樣の電界となるため平行板コンデンサの静電容量を求める式が成立する。しかしながら、モジュール面積が小さい場合、フレーム近傍の電気力線の影響が大きくなる。このため平行板コンデンサの静電容量を求める式では誤差が大きくなると考えられる。

以上より、バックシートにアルミシートを用いたモジュールは、面積と断面高さの関係が一

表 3-3 対地静電容量の測定値と計算値の誤差

Maker	PV types	Capacitance[nF]		Error [%]
		Measurment	Calculation	
A	Polycrystal	1.5	0.9	39.6
B	Microcrystalline	1.9	1.9	0.5
C	Monocrystal	1.6	1.4	18.2
F	CIGS	1.6	1.5	2.9
	CIGS	1.6	1.5	4.1
G	CIGS	1.5	1.2	24.4

定値以上において (3-1) 式を用いて対地静電容量を求めることが可能であると考えられる。

また、図 3-3 においてモジュール面積と断面高さの比が小さくなると誤差は大きくなっているが、対地静電容量の値が 1.5 nF 付近に収束する傾向が見られる。このため、フレーム近傍の一樣ではない電界の影響を考慮できるような補正係数を設定すれば、平行板コンデンサの静電容量を求める式を用いてバックシートにアルミシートを用いたモジュールの対地静電容量を求めることは可能であると考えられる。

バックシートに PET を用いたモジュールの対地静電容量はすべて 1 nF 以下である。対地静電容量が小さいと、地絡時に発生する事故電流も小さく地絡保護協調への影響は少ない。従って、地絡保護協調の検討を行う場合、同規模のアレイと比較すると、対地静電容量が大きく地絡時の事故電流が大きいと考えられるバックシートがアルミのモジュールを使用すればよい。

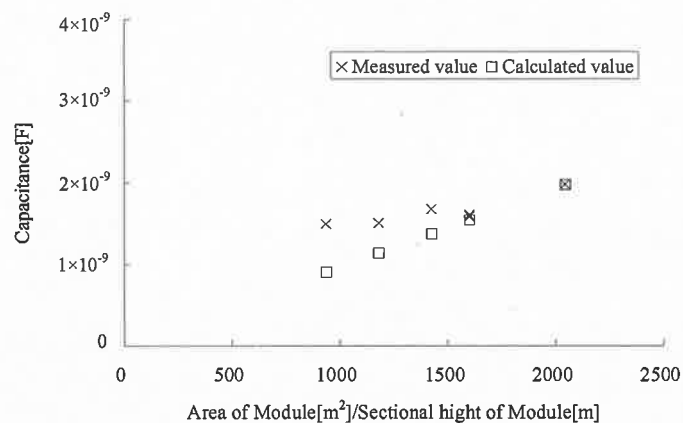


図 3-3 対地静電容量の測定値と計算値

3.2.2 地絡時における健全系統の不平衡電流

(1) 需要家モデルの設定

図 3-8 に漏電遮断器の動作整定の条件を検討するための需要家モデルを示す。当該モデルは需要家の設備構成を単純化したものである^[28]。地絡電流の計算のために単純化できるのは、対地間インピーダンスがすべて並列回路となるからである。このため、変圧器群が増えても変圧器毎に対地静電容量を介して流れる電流を計算すればよく、それぞれを独立して計算した後に合成することができる。なお、太陽光発電システムは 10 kW で PCS は電圧制御型^[29]とシトランスレスとする。^{[30], [31]}

(2) 漏電遮断器の適切な動作整定値を決定する方法

これまで漏電遮断器の動作整定を決定する方法は明確に示されていない。漏電遮断器が多段構成されると、一般的に上位側の動作整定が優先され下位側は上位側の動作整定を下回るように設定されている。また、漏電遮断器の動作整定は経験的に決定されているため、不要動作する事故が後を絶たない。漏電遮断器の不要動作の要因は、漏電遮断器 2 次側の対地静電容量の大きさが関係する。適切な動作整定値を決定するためには、漏電遮断器 2 次側に接続されるケーブルや機器の対地静電容量が考慮されなければならない。対地静電容量が大きい場合、漏電遮断器は不要動作しやすくなる。太陽光発電システムは交流電路との連系点に漏電遮断器が設置されている。この漏電遮断器の動作整定も太陽電池アレイの設備容量等により対地静電容量を考慮しなければ不要動作が発生する恐れがある。このことから、漏電遮断器の動作整定は、まず下位側に設置される漏電遮断器に流れる零相電流を求めなければならない。

図 3-8 に示す需要家モデルにおいて、三相 3 線配線方式の電路のある地点で抵抗 R_g [Ω]を通して対地と接続されたものとする。このとき主漏電遮断器に流れる零相電流 I_{0_Main} 、分岐漏電遮断器に流れる零相電流 I_{0_sub} はキルヒホッフの第二法則を用いると (3-4) 式、(3-5) 式となる。

$$\dot{I}_{0_Main} = -\frac{j\omega(3C' + 2C'')}{\frac{1}{R_g} + \frac{1}{R_B} + j\omega(3C + 3C' + 2C'')} \cdot \frac{\dot{E}_1}{R_g} \quad (3-4)$$

$$\dot{I}_{0_sub} = -\frac{j\omega 2C''}{\frac{1}{R_g} + \frac{1}{R_B} + j\omega(3C + 3C' + 2C'')} \cdot \frac{\dot{E}_1}{R_g} \quad (3-5)$$

$$\text{ただし,} \quad C = C_1 = C_2 = C_3, \quad C' = C_4 = C_5 = C_6, \quad C'' = C_7 = C_8$$

地絡電流 I_g は、対地電圧を地絡抵抗で除したものであるが、漏電遮断器に流れる電流は、その漏電遮断器の 2 次側にある対地静電容量によって決まる。健全な系統に設置されている漏電遮断器に不要動作を発生させない条件は、(3-4) 式 および (3-5) 式で求められる電流値が漏電遮断器の動作整定を下回ればよい。このことから主漏電遮断器の動作整定 I_{g_Main} とそこに流れる零相電流 I_{0_Main} 、分岐漏電遮断器の動作整定 I_{g_sub} とそこに流れる零相電流 I_{0_sub} との関係は (3-6) 式となる。

$$\dot{I}_{g_Main} > \dot{I}_{0_Main} > \dot{I}_{g_sub} > \dot{I}_{0_sub} \quad (3-6)$$

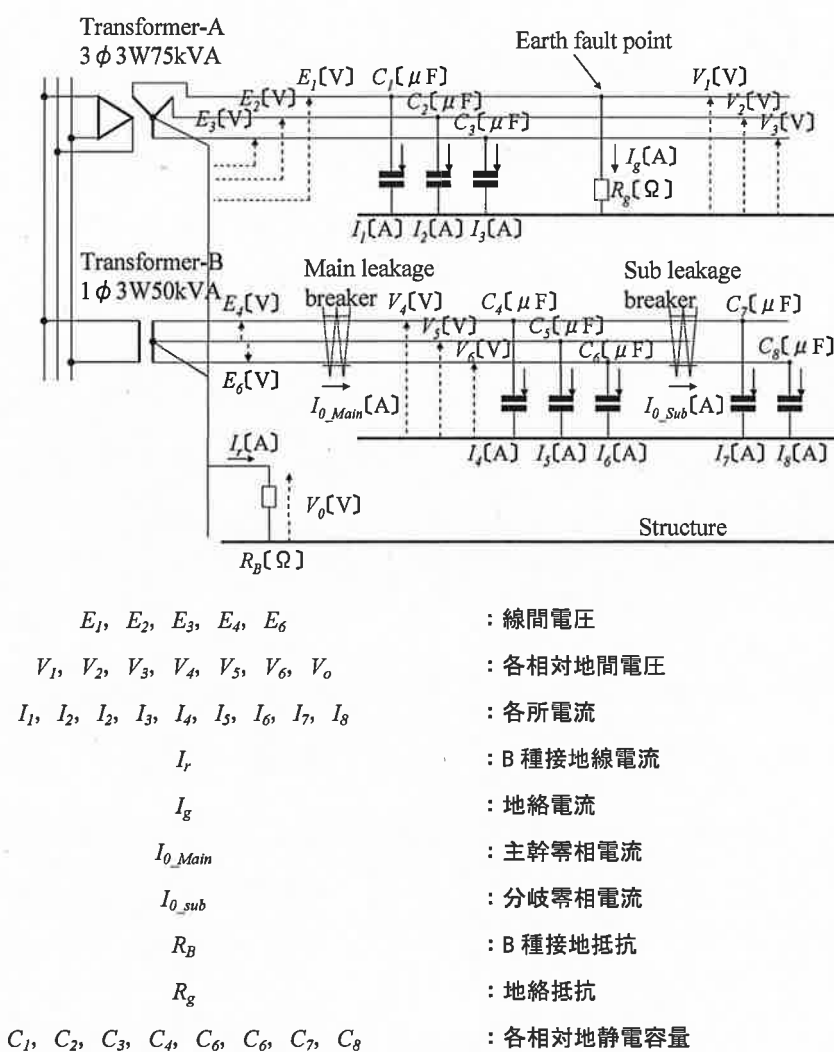


図 3 - 8 電気設備モデル

表 3-5 に規格で示されている漏電遮断器の動作整定値を示す。(3-6) 式と不動作領域を考慮した直近上位の値が動作整定の適正值となる。

また、漏電遮断器の動作整定は必ず下位側を優先する。上位側の動作整定はこれを上回るように設定されるが、(3-6) 式が成立しない場合、つまり主漏電遮断器の動作電流 I_{g_Main} が整定値として存在しない場合、絶縁変圧器を主漏電遮断器の 2 次側の電路上に設置しなければならない。

3.2.3 保護協調の最適化

(1) 検証に用いた需要家設備

検証は、太陽光発電設備とは無関係の設備において発生した地絡事故（以下、他系統）により太陽光発電設備の漏電遮断器が不要動作した需要家において行った。需要家設備のうち、検証に必要な系統を示したものが図 3-9、また、機器の概要を表 3-6 に示す。当該需要家は三相 3 線 6.6 kV 60 Hz 高圧受電、三相 3 線 210V300kVA が 2 台、单相 3 線 210-105 V 150 kVA 変圧器が 3 台あり、单相変圧器のうちの 1 台が太陽光発電設備専用である。B 種接地極はすべての変圧器で共用されている。図 3-9 は、すべての変圧器のうち、地絡が発生した他系統の单相変圧器と、太陽光発電設備専用の单相変圧器の 2 台を示している。

表 3-5 漏電遮断器の動作整定

Standard No.	Current value [A]
IEC 60947-2	0.006, 0.01, 0.03, 0.1, 0.3, 0.5, 1, 3, 10, 30
JIS C 8201-2-2	0.005, 0.006, 0.01, 0.015, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 3, 5, 10, 20, 30

表 3-6 太陽光発電設備の主要機器

Equipment	Outline
Main leakage breaker 400AF/250AT	Setting zero phase current : 0.1 A, Setting time : 0.1 sec
Sub leakage breaker 50AF/30AT	Setting of zero phase current : 0.03 A, Setting time : 0.1 sec
Power conditioner (PCS)	Input voltage : DC 240 V, Output capacity : 4 kW Output voltage : AC 202 V \pm 12 V
Zero phase current transformer of DC	Setting zero phase current : 0.1 A, Setting time : 0.2 sec
PV array	CIGS 125 W \times 32, W 1417 mm \times D 791 mm \times H 37 mm

太陽光発電設備の定格出力は 120 kW であり、No. 1 と No. 2 の二つの分電盤にそれぞれ 60 kW 接続されている（図 3-9 では No. 1 のみ記載）。分電盤には分岐が 15 回路あり、1 回路あたり 4 kW の PCS と 4 kW のアレイが接続されている。（図 3-9 では 1 系統のみ記載）。アレイは CIGS 系でモジュール出力 125 W が 32 枚から構成されている。分電盤は、主幹漏電遮断器 400 AF / 250 AT、分岐回路漏電遮断器 50 AF / 20 AT から構成されている。動作整定はそれぞれ主幹漏電遮断器が $0.1 \text{ A} \cdot 0.1 \text{ s}$ 、分岐回路漏電遮断器が $0.03 \text{ A} \cdot 0.1 \text{ s}$ である。

（２） 漏電遮断器の適切な動作整定値および絶縁変圧器の要否

図 3-9 に示す需要家において発生した、太陽光発電システムの主幹漏電遮断器の不要動作について調査を行った。調査の結果、他系統において地絡が発生していたことが確認できた。そこで、3.2.2 に示す漏電遮断器の動作整定の導出過程を用い、適切な動作整定値の算出を行って、絶縁変圧器の要否を判定した。

図 3-10 は、他系統地絡が発生したときに測定された電圧・電流波形である。測定器は日置電機社製電源ラインモニタ 4284A を用いた。図 3-10 (a) に中性相と対地間電圧（N - G 間電圧）、図 3-10 (b) に No. 1 主幹零相電流波形、表 3-7 にそれぞれの数値を示す。図 3-10 (a) および図 3-10 (b) の 8 ms 付近において電圧波形と電流波形が過渡的に変化している箇所があるが、この部分で地絡が発生したことを示している。No. 1 主幹零相電流は、地絡発生時において瞬時値の最大値が 0.285 A であるが、その後、減衰する。地絡発生時を基準として実効値を求めると最大で 0.084 A になる。N - G 間電圧の波高値の最大値は 123 V である。完全地絡時（地絡抵抗がほぼ零）において N - G 間電圧の瞬時値の最大値は 140 V 程度となることから、この測定

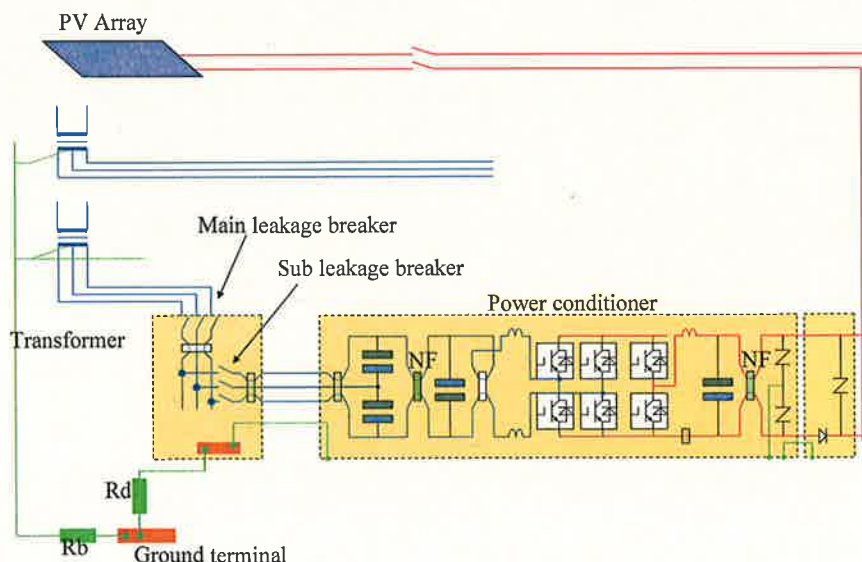


図 3 - 9 電気設備モデル

波形が得られたときの状況は、完全地絡ではなく十数 Ω 程度の抵抗を介した地絡であると判断できる。従って完全地絡事故が発生すると更に大きな零相電流が流れることが考えられる。PCSの交流側零相電流、直流側零相電流、接地線電流は、それぞれ表 3-7 に示す通りである。

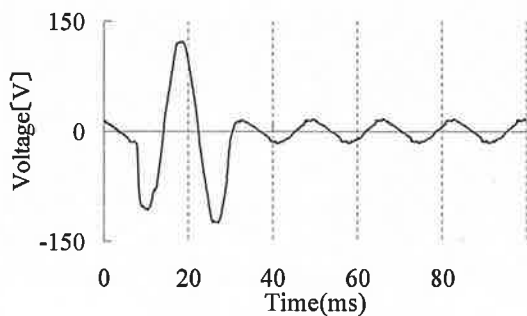
ここで完全地絡事故を想定した零相電流を算出する。はじめに、アレイの対地静電容量を算出する。採用されているモジュールはバックシートにアルミを用いた CIGS で、1 枚当たりの対地静電容量は (3-1) 式より 1.5 nF となる。1 回路当たりモジュールが 32 枚なので、分岐回路単位の対地静電容量は 32 枚分を合計するため 48 nF となる。分岐は 15 回路あるので主幹回路単位では合計 0.72 μ F となる。

PCS からアレイまでは 1 系統あたり 200 m で、架橋ポリエチレンで絶縁されたケーブルで、断面積 8 mm²、2 芯、対地静電容量は 1 m 当たり 0.29 nF が用いられている。このため、1 系統の合計の対地静電容量は 0.87 μ F となる。

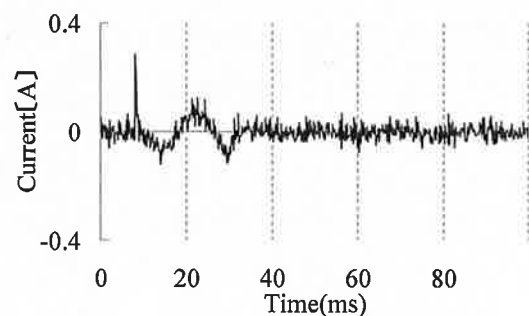
次に、各所の零相電流を算出する。三相 210V 系統で地絡事故が発生した場合、アレイの分

表 3-7 測定値

Measured point	Maximum value of instantaneous current[A]	R.M.S.[A]
Zero phase current of Main leakage breaker	0.285	0.084
Zero phase current of AC at PCSNo1-1	0.018	0.006
Zero phase current of DC at PCSNo1-1	0.007	0.003
Earth current at PCSNo1-1	0.007	0.003



(a) 中性相と対地間電圧



(b) 主幹零相電流

図 3-10 測定結果

岐漏電遮断器に流れる零相電流 I_{0_sub} は (3-5) 式を用いて 0.008 A となる。分岐漏電遮断器の動作整定 I_{g_sub} は 0.03 A である。これは (3-7) 式が成立するので問題ないと判断できる。

$$\dot{I}_{g_sub} > \dot{I}_{0_sub} \quad (3-7)$$

アレイの主幹漏電遮断器に流れる零相電流 I_{0_Main} は、(3-4) 式を用いて 0.125 A となる。主幹漏電遮断器の動作整定 I_{g_Main} は 0.1 A である。これは (3-8) 式を満足するが、(3-9) 式は成立しないので不要動作に至る。

$$\dot{I}_{0_Main} > \dot{I}_{g_sub} \quad (3-8)$$

$$\dot{I}_{g_Main} > \dot{I}_{0_Main} \quad (3-9)$$

(3-9) 式を満足させるために、主幹漏電遮断器の動作整定を見直す必要がある。完全地絡時に主幹漏電遮断器に流れる零相電流 0.125 A よりも大きくするため、直近上位で且つ漏電遮断器の仕様から、動作整定を 0.2 A とした。以上の処置により、他系統での地絡事故は発生しているものの波及事故がなく、最適値を決定する方法の有効性と対策の効果が証明された。

3.3 直流配電地絡時の波及防止製品の開発と評価

直流配電で地絡が発生すると様々な障害が発生する。先のように保護協調の検討を行うことも重要であるが、さらにその効果を高める為、波及防止対策製品について検討を行った。

3.3.1 一般的な波及防止

直流配電で地絡が発生するとPCSの交流配電側に絶縁変圧器を設置することや、直流電流を検出する継電器により事故時に直流配電と交流配電を切り離す装置を設ける。絶縁変圧器を設ける場合、PCS単独である場合が多く、事故による波及範囲は限定的である。継電器による直流電流の検出の場合、継電器が検出する時間と遮断器などの事故電路を切り離す装置の動作時間である数十msの間、直流電流が交流配電に流出する。これを防止するためにはPCSそれぞれに絶縁変圧器を設けるしかないが、経済的な負担が大きく、設置スペースが無いなどの理由から採用されない場合が増えている。このため、直流電流が流れるわずかな時間、事故事例で述べたような直流電流による変圧器の偏磁現象が発生する。このため絶縁変圧器を設けることなく直流電流を防止する対策が必要となる。

3.3.2 コンデンサ接地方式の特徴

直流配電は、データセンタや一般家庭への導入事例^{[32], [33]}が報告されているが、オフィスや工場などでも関心が高まっている^{[34], [35]}。これは、太陽光発電システムなどの直流発電装置の導入事例が増加していること、LED照明やOA機器、生産装置などの直流電源を必要とする機器が増加していることが要因であると考えられる。直流配電において地絡などの事故が発生した場合、交流配電と同様に保護協調について検討しなければならない。直流配電において地絡事故が発生すると、直流成分を含んだ事故電流が流れる。太陽光発電設備のPCSには、直流の事故電流を検出する装置が内蔵され、事故発生時にPCSを停止させるなどの制御を行っている。しかしながら、事故電流の検出は、最低でも0.1秒程度の時間を要しているものがほとんどである。このため、PCSがトランスレス方式であると、事故電流を検出するまでの時間、直流成分を含んだ事故電流は、交流配電系統に流れる。交流配電系統に直流成分を含んだ電流が流れると、変圧器に偏磁現象が発生する。変圧器の偏磁現象は、主にコンバータやインバータに内蔵される変圧器に発生したり、太陽の黒点活動に起因する磁気嵐により誘起される直流電流によって発生することが報告されている^{[36], [37]}。変圧器に偏磁現象が発生すると、励磁電流や騒音が増加する。この偏磁現象についていくつか対策方法が提案されている^{[38]-[40]}。しかしながら、太陽光発電設備などの直流配電における地絡事故時は、変圧器に対しては、直流電流が直接流れる。このような場合において、変圧器の励磁電流、電源側や負荷側の電圧がどのような状態になるかは明らかにされていない。また、偏磁現象に対しては、経済性を考慮した対策が必要であると考えられる。

本節では変圧器の偏磁現象について実験設備を構築し、模擬的に直流地絡を発生させ、その

現象を実験的に明らかにするとともに、抵抗付き接地コンデンサを用いた対策の効果を確認する。

3.3.3 抵抗付きコンデンサ接地方式の開発

変圧器の偏磁現象を防止するためには、直流電流を流さないようにすることが必要であり、高抵抗接地もしくは非接地となる IT 接地方式を採用することが一つの方法である。IT 接地方式の一つとしてコンデンサによる高抵抗接地方式がある。しかしながら、コンデンサ接地は、直流地絡時の直流電位上昇による障害が懸念される^[41]。この直流電位の発生を防止するため、コンデンサに並列に抵抗素子を接続した、抵抗付接地コンデンサを開発した。図 3-11 は、抵抗付接地コンデンサの外観であり、表 3-8 は、その仕様を示している。接地コンデンサの仕様は、今回の 100 V 配電系統の場合、コンデンサ容量は 16 μ F となる。抵抗素子の選定は、コンデンサが充電された状態から、1 秒以下で 50 V 以下になることとした。コンデンサの充電電圧は、電気設備で決められているすべての配電電圧に対応している。地絡時には、地絡電流が当該素子を流れた場合において、抵抗素子の温度上昇が懸念される。地絡時においても装置内部の温度が、50 $^{\circ}$ C 以下になるようにした。また、地絡時の事故電流に影響を与えないことも選定の条件とした。

コンデンサ容量 C [F]、初期電荷 Q_0 [C] が帯電し、これを抵抗 R [Ω] で放電する場合の過渡現象は (3-10) 式が成立する。

$$0 = \frac{q}{C} + R \frac{dq}{dt} \quad (3-10)$$

このとき流れる電流 I は、(3-11) 式となる。

$$I = \frac{Q_0}{CR} e^{-\frac{t}{CR}} \quad (3-11)$$



図 3-11 抵抗付接地コンデンサ

時定数を 1 として抵抗素子の値を求めると $R = 12.5 \text{ k}\Omega$ が導かれる。ここで更に 1.5 倍の安全率を見込み、製品化時点では $20 \text{ k}\Omega$ を選定した。図 3-12 に $R = 20 \text{ k}\Omega$ の場合における、放電特性を示す。直流電位は、797 ms 後にほぼ 0 V となる結果が得られ、 $R = 20 \text{ k}\Omega$ を選定した。

健全時における抵抗素子 $R [\Omega]$ の 1 素子で消費される電力 $P [\text{W}]$ は、三相 3 線式 210 V 配線方式の場合において、常時 6.1 mA の電流が流れるので、(3-12) 式が成立する。

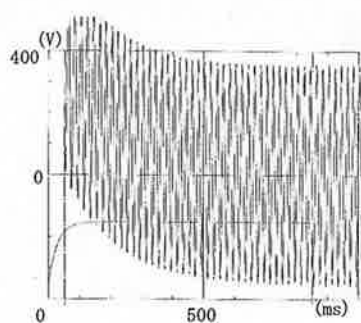


図 3-12 抵抗付接地コンデンサの放電特性

表 3-8 抵抗付接地コンデンサの仕様

Rated voltage	AC 121 V
Max. voltage	AC 872 V
Rated frequency	50 / 60 Hz
Rated resistance	$20 \text{ k}\Omega \times 3$
Rated capacitance	$16 \mu\text{F} \times 3$ at 100 V
Rated power	At general : 2.4 W, at earth fault: 4.8 W
Temperature	- 10 ~ + 40
Size	Width 400 mm × Depth 210 mm × Hight 310 mm
Weight	17 kg

$$P = \frac{3 \left(\frac{V}{\sqrt{3}} \right)^2}{R} = 2.2 \quad (3-12)$$

一線の完全地絡時では、事故電流が 10.5 mA となるので、(3-13) 式となる。

$$Pg = \frac{2V^2}{R} = 4.4 \quad (3-13)$$

表 3-9 は、温度上昇試験の結果である。試験の結果、抵抗付接地コンデンサの内部温度を 50℃ 以下に抑えることができた。

3.3.4 抵抗付接地コンデンサを用いた試験

図 3-13 は、抵抗付接地コンデンサによる実験設備を示している。図 3-14 は、P 相側に直流電圧 70 V を印加した場合、図 3-15 は、N 相側に直流電圧 70 V を印加した場合を示している。図 3-14 (b) , 図 3-15 (b) はともに、抵抗付接地コンデンサの両端電圧を示している。AC/DC コンバータより、直流電圧を印加すると、中性相と対地間の電圧は、交流電圧にプラス方向もしくはマイナス方向に直流電圧が重畳している。しかしながら、図 3-14 (a), 図 3-15 (a) に示す励磁電流は、初期状態における励磁電流の波形とほぼ同様である。このことは、抵抗付接地コンデンサが、偏磁現象の防止に効果的であることを示している。

表 3－9 温度試験

Measured point	Normal(℃)	Earth fault(℃)
Phase R resistance surface	55.8	68.6
Phase S resistance surface	55.3	67.0
Phase T resistance surface	55.4	49.5
Box inside	49.5	49.2
Box surface	49.2	49.1

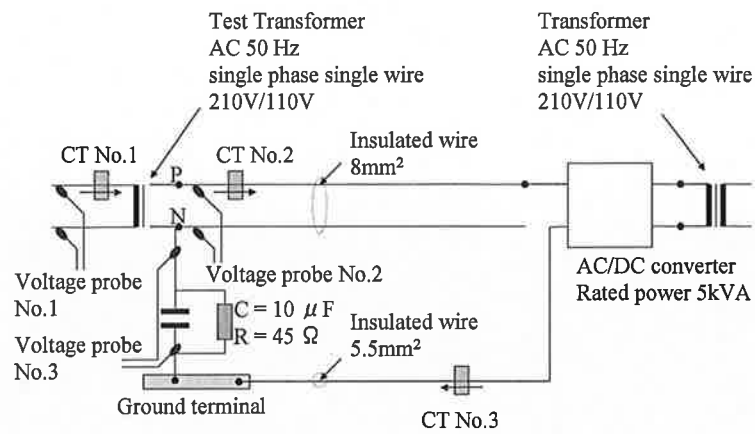
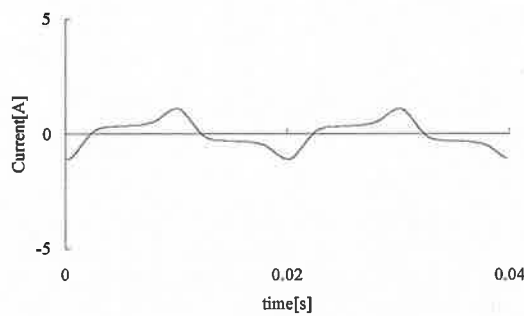
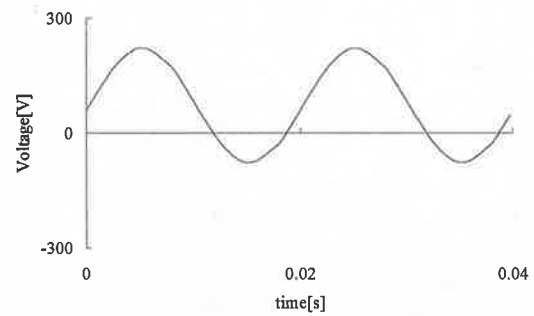


図 3 - 1 3 実験システム

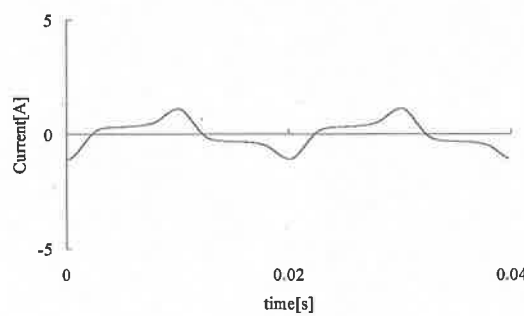


(a) 変圧器 1 次側の電流

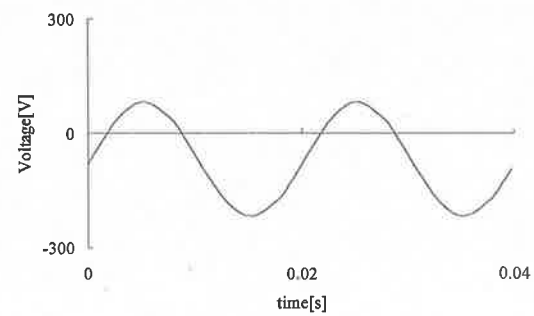


(b) 抵抗両端の電圧

図 3 - 1 4 直流電圧印加時 (P 相側)



(a) 変圧器 1 次側の電流



(b) 抵抗両端の電圧

図 3 - 1 5 直流電圧印加時 (N 相側)

3.4 まとめ

本章では、直流配電の低周波領域における EMC に関する実験的検討として、大きく二つのことを行った。一つは、直流配電の地絡保護協調において他系統の漏電遮断器の不要動作を防止するための整定方法について検討した。これについて明らかにされたことを以下に示す。

- (1) 太陽電池モジュールはバックシートに PET を用いているもの、アルミを用いているものの2種類がある。アルミシートを用いているものは、一部、太陽電池モジュールの面積と断面高さの条件によっては誤差が大きくなる場合があるが、平行板コンデンサの静電容量を算出する一般的な式を用いて対地静電容量を求めることが可能である。
- (2) 静電容量を算出した式を用いて太陽電池モジュールの対地静電容量などを考慮した地絡保護協調の適切な設計方法を明らかにした。この設計方法を用いて、地絡波及事故が発生している実際の需要家において漏電遮断器の動作整定が条件を満足していないことを明らかにし、条件を満足するように動作協調の見直しを行った。その結果、波及事故は発生せず良好な結果を得た。

もう一つは、直流配電の地絡事故時の変圧器偏磁現象に関する対策製品を開発した。これについて明らかにされたことを以下にまとめる。

- (1) 変圧器の偏磁現象は、印加される直流電圧が大きくなると、変圧器の励磁電流が増加する。本実験システムでは、変圧器の2次側電圧は変化しないが、重畳する直流電圧や直流電流の大きさによっては、変圧器が飽和し、変圧器2次側の電圧ひずみを拡大させる恐れがある。
- (2) 変圧器の偏磁現象は、変圧器に直流電流が流れることが原因である。その対策として、接地コンデンサが考えられるが、直流地絡時の電位上昇の恐れがあるので、抵抗付接地コンデンサが有効であると考えられる。

第4章 直流配電の高周波領域におけるEMCに関する実験的検討

4.1 まえがき

これまで日本国内では、B 種接地工事を単独とする接地方式が一般的に採用されてきた。IEC 規格ではこれを TT 接地方式と呼んでいる。IEC 規格では TT 接地方式の他に、TN 接地方式や IT 接地方式がある^{[42]-[44]}。電子機器などのノイズ耐量の低い機器の増加に伴い、接地方式が適切に選択されないと、機器の誤動作や焼損に至る恐れがある^{[45]-[47]}。これまで接地方式ごとの高周波の特性について検討された研究はいくつかある^{[48]-[52]}。これらは電子機器の誤動作に着目しており、扱う帯域も数百 kHz から MHz 帯である。しかしながら、ビルや工場において発生するノイズ障害は、インバータのスイッチングに起因して発生する数 kHz 帯域の高周波電流に影響されると考えられる。インバータには電圧形と電流形があるが、現在では電圧形が主流となっている。インバータのスイッチングによって発生する高周波電流は、電子機器を誤動作させるばかりでなく、機器の焼損などの致命的な障害に至る場合もある。筆者は、これまでも電子機器の誤動作や SPD (Surge Protective Device)・CT (Current Transformer) といった機器の焼損、接地コンデンサの過熱事故を経験している。これらの障害は、動力系統に設置されているインバータから発生した高周波電流が、変圧器が異なる別の配線系統に流れ、その系統に設置されている電子機器などに影響を及ぼす例が最も多い。直流配電では、インバータ機器が多く用いられるため、障害の増加が懸念される。したがって、インバータのスイッチングに起因する高周波電流の、それぞれの接地方式における発生の状況や、他の系統へ高周波電流が流れるメカニズムを明らかにすることは、適切な接地方式を設計するために必要であるばかりでなく、各種障害の未然防止や、事故が発生した場合において、その要因を分析するために重要となる。

本節では、実際の建物に設置される電気設備を想定した実験システムを構築し、電圧形インバータのスイッチングに起因する高周波電流の接地方式ごとの発生状況、および高周波電流の他の系統への廻り込みのメカニズムについて実験的に明らかにする。

4.2 直流配電における高周波ノイズ

4.2.1 異なる接地方式における実験結果と検討

(1) 実験回路及び機器構成

実験設備を図 4-1 に示す。配線方式は、三相 3 線 210 V 配線方式と単相 3 線 210 / 105 V 配線方式を、それぞれ 1 系統とした。三相 3 線 415 V 配線方式や三相 4 線 182 / 105 V 配線方式などもあるが、対地電圧が平衡していることもあり、本実験設備に用いている配線方式で高周波の挙動が明らかになれば、回路シミュレーションを用いて検討可能と判断した。

実験設備は縦 7 m、横 7 m、厚さ 0.02 m の木板の上に設置した。この実験設備において、インバータで誘導電動機を稼動し、インバータから発生する高周波電流を、TT 接地方式及び TN 接地方式の場合についてそれぞれ測定した。

インバータのキャリア周波数（数 kHz）からその高調波成分の十数 kHz から百十数 kHz までを十分に測定できるように、電圧は横河電機製の差動プローブ 700925（DC ～ 15 MHz，入力インピーダンス $3\text{ M}\Omega \cdot 10\text{ pF}$ 並列），電流は日置電機製の電流プローブ 3274（DC～10 MHz）を使用し横河電機製オシロスコープ DL9040（5 GS / s）に入力した。このように数 kHz 帯からその高調波成分を含めて十分測定が可能な機器を用いた。電圧プローブは後述する主接地端子を正極，電路側を負極とし，電流プローブは電路から後述する主接地端子の方向，および電路から負荷の方向を正とした。

（２） 実験に用いた機器類

表 4-1 は実験に用いた変圧器の仕様，表 4-2 は三相 3 線配線方式の負荷となるインバータ機器の仕様，表 4-3 は誘導電動機の仕様を示している。これらは汎用的に用いられているものである。誘導電動機についてはこれよりも大型の仕様も考えられるが，誘導電動機の対地静電容量は，ケーブルやフィルタなどの対地静電容量と比較し小さく，定格容量が大きくてもほぼ変わらない^[53]。このため誘導電動機の定格容量の違いは，実験結果に影響を及ぼさないと判断した。

変圧器から配線されるケーブルは，断面積 5.5 mm^2 の CVT ケーブルで変圧器の負荷側の接続点からの長さを 10 m（ $R = 43.4\text{ m}\Omega$ ， $L = 2.9\text{ }\mu\text{H}$ ， $C = 2.5\text{ nF}$ ：製造会社から仕様書による）とした。高周波の挙動解析において，ケーブルの定数として重要なのは，ケーブルの長さなどによって決まる抵抗とインダクタンス及び対地静電容量であると考えられる。しかしながら，ケーブルのインピーダンスは，ノイズフィルタや変圧器，リアクトルのインピーダンスと比較して小さいこと，対地静電容量は後述するキャパシタンス素子によって模擬できると考えて，ケーブルサイズや長さは実験室や実験システムの大きさを考慮して決定した。

単相 3 線配線方式には，ケーブルの浮遊静電容量や負荷機器のフィルタを想定したキャパシタンスを接続した。キャパシタンスは，これまでの経験を踏まえ， $0.1\text{ }\mu\text{F}$ から $2\text{ }\mu\text{F}$ まで $0.1\text{ }\mu\text{F}$ 刻みで段階的に変えた。数 μF 程度と大きな場合もあるが，大型で特殊な生産装置が設置さ

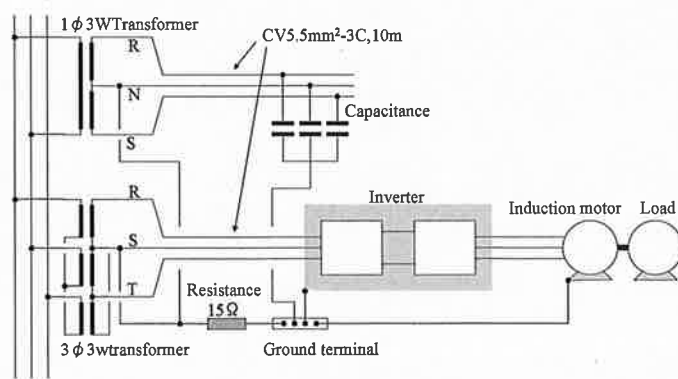


図 4-1 実験システム

れている場合に限られるので、本実験の条件から除外した。

インバータと誘導電動機を接続するケーブルは、断面積 5.5 mm^2 で長さ 10 m の CVT ケーブルを用いている。実際の施工においてシールドケーブルや金属管工事が採用されることもあり、実験では金属管の有る場合と無い場合について測定した。

(3) 実験に用いた接地方式

TT 接地方式における B 種接地抵抗は 15Ω の抵抗素子で模擬した。これは、本研究において対象とする数 kHz 程度の周波数帯域では、定常抵抗特性を示すことが報告されているからである^{[54]-[57]}。抵抗素子は、三相 3 線配線方式では、図 4-1 に示す S 相、单相 3 線配線方式では、同図に示す中性相 (N 相) に接続した。抵抗素子は、容易に取り外しが可能で、短絡することで TT 接地方式から TN 接地方式へ切替えられる。

木板上に主接地端子を設け、主接地端子から B 種接地抵抗を模擬した抵抗素子・インバータの接地端子・誘導電動機の接地端子及びフィルタを模擬したキャパシタンスを断面積 5.5 mm^2 で長さ 5 m の IV 電線 ($R = 19.3 \text{ m}\Omega$, $L = 1.7 \text{ }\mu\text{H}$, $C = 3.8 \text{ nF}$) で接続した。電圧測定における基準点は、この主接地端子とした。

表 4-1 変圧器の仕様

Primary voltage	210 V
Secondary voltage	210 V / 105 V
Capacity	2 kVA
Primary resistance	0.711Ω
Secondary resistance	0.145Ω
Percent impedance	4.02 %

表 4-2 インバータの仕様

Rated Voltage	200 V
Rated Power	5.5 kW
Number of Phases	3
Carrier frequency	7 kHz

表 4-3 誘導電動機の仕様

Rated Voltage	200 V
Rated Current	21.4 A
Rated Power	5.5 kW
Number of Phases	3
Number of Poles	4

(4) 実験結果

① 中性相の対地電圧と B 種接地線電流

図 4-2 は、それぞれの接地方式における中性相の対地電圧、図 4-3 は、B 種接地線電流波形を示している。中性相の対地電圧は TT 接地方式において、測定時間内において 14.2 Vp-p（最大値と最小値の差）である。これと比較し、TN 接地方式では、B 種接地線電流は流れているものの、B 種接地抵抗に相当する $15\ \Omega$ の抵抗素子が無いためほぼ 1.1 Vp-p である。

B 種接地線電流は、TT 接地方式の場合、226 mAp-p、これと比較し TN 接地方式の場合、429 mAp-p である。

インバータから発生する高周波電流の流れる経路は、インバータやケーブルなどの回路インピーダンスによって決まる。TN 接地方式の場合、B 種接地抵抗がないため、B 種接地線に流れる高周波電流は、TT 接地方式と比較すると大きくなる。しかしながら、電気設備回路全体のイ

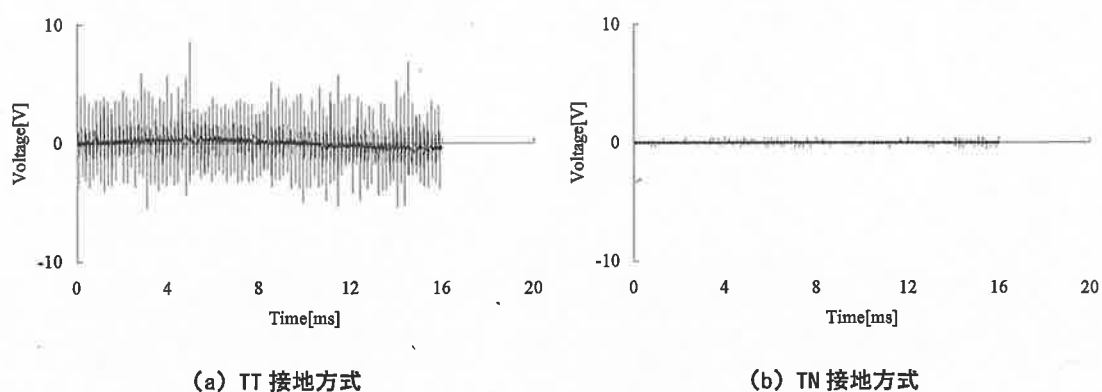


図 4-2 中性相と対地間電圧波形

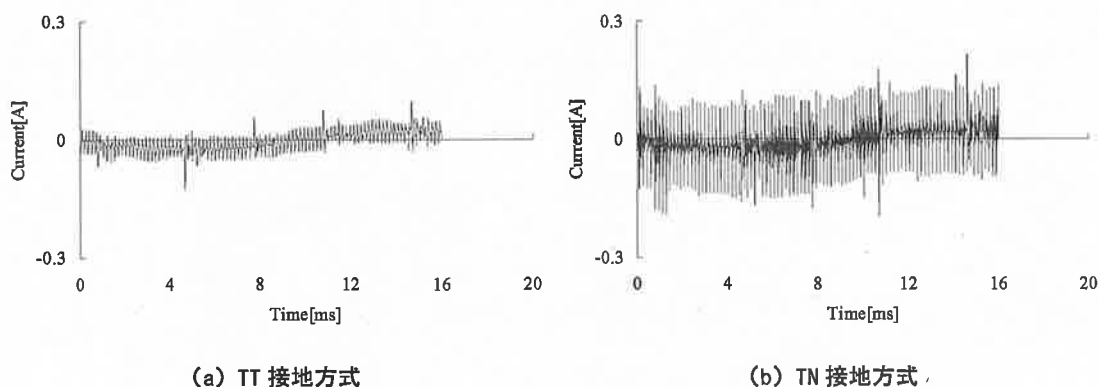


図 4-3 B 種接地線電流波形

ンピーダンスに影響するため、B 種接地線に流れる電流が急激に増加するわけではない。B 種接地線に流れる高周波電流は、構造体を介して流れることになるため、電流が大きい場合、誘導障害を引き起こす恐れがある。

② DC 配線の正極と対地間電圧

図 4-4 は、それぞれの接地方式におけるインバータ内部の DC 配線の正極と対地間電圧波形を示している。ここでは顕著な違いは確認できなかった。これは、インバータの電源側および負荷側の各相と対地間電圧についても同様である。

③ インバータの電源側及び負荷側の零相電流、誘導電動機及びインバータの接地線電流（電線管未使用）

図 4-5 は、それぞれの接地方式におけるインバータ電源側の零相電流、図 4-6 は、インバータ負荷側の零相電流、図 4-7 は、誘導電動機の接地線電流、図 4-8 は、インバータの接地線電流波形を示している。インバータの電源側の零相電流は、図 4-5 (a) が TT 接地方式の場合で、478 mAp-p、図 4-5 (b) が TN 接地方式の場合で、368 mAp-p となった。インバータ負荷側の零相電流は、図 4-6 (a) が TT 接地方式の場合で、294 mAp-p、図 4-6 (b) が TN 接地方式の場合で、294 mAp-p となった。誘導電動機の接地線電流は、図 4-7 (a) が TT 接地方式の場合で、228 mAp-p、図 4-7 (b) が TN 接地方式の場合で、364 mAp-p となった。

インバータの接地線電流は、図 4-8 (a) が TT 接地方式の場合で、406 mAp-p、図 4-8 (b) が TN 接地方式の場合で 492 mAp-p となり、TN 接地方式の方が増加した。図 4-8 (a)、(b) を比較すると、TN 接地方式の方が TT 接地方式と比較し、振幅が大きくなっていることが確認できる。

④ 单相 3 線式配線方式の零相電流

図 4-9 は、それぞれの接地方式における单相 3 線配線方式の零相電流波形を示している。当

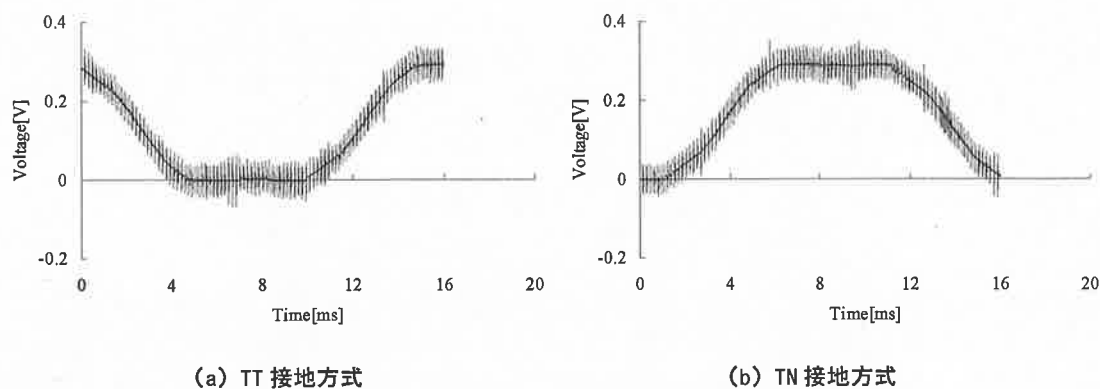
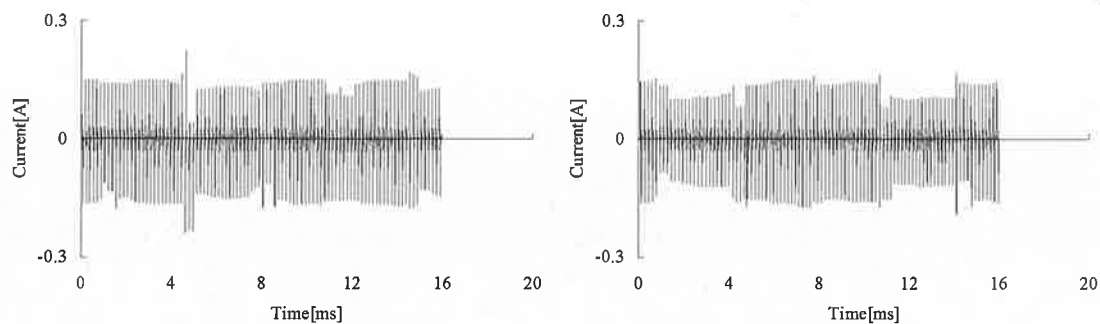


図 4-4 直流配線のプラス側配線と対地間の電圧波形

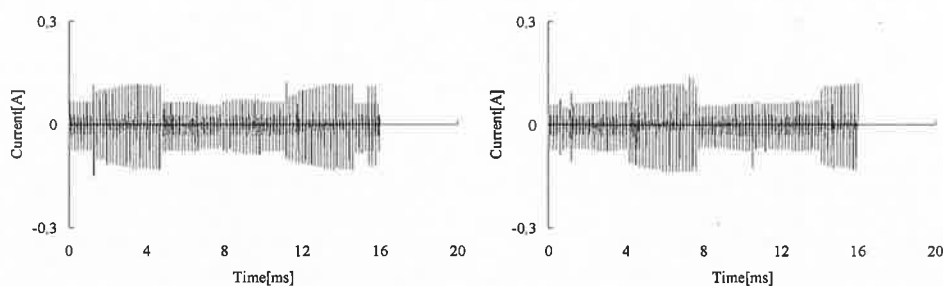
該系統に負荷機器は接続されていないが、三相 3 線式配線方式に設置されているインバータから発生する高周波電流の影響により電流が流れている。TN 接地方式の場合、368 mAp-p,



(a) TT 接地方式

(b) TN 接地方式

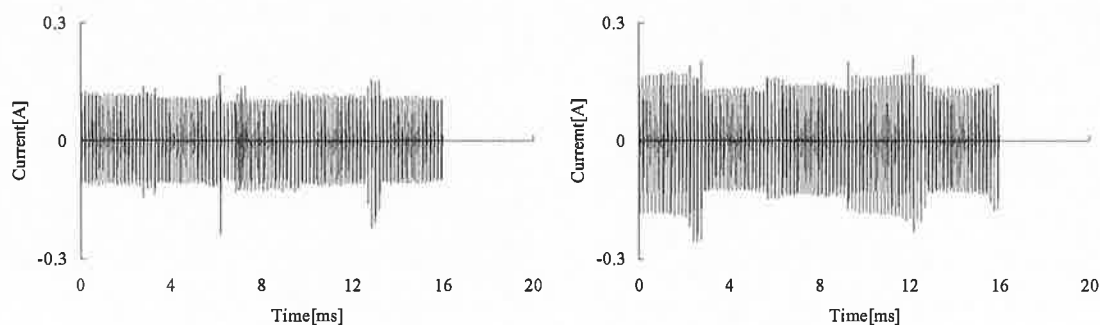
図 4-5 インバータの電源側における零相電流波形



(a) TT 接地方式

(b) TN 接地方式

図 4-6 インバータの負荷側における零相電流波形



(a) TT 接地方式

(b) TN 接地方式

図 4-7 誘導電動機の接地線電流波形

TT 接地方式の場合、509 mAp-p となり、TT 接地方式の方がわずかではあるが大きくなった。これは、対地静電容量を模擬したキャパシタンスの影響、および図 4-2 に示す中性相の対地電圧である零相電圧が TN 接地方式と比較して、TT 接地方式の方が大きいことが要因である。

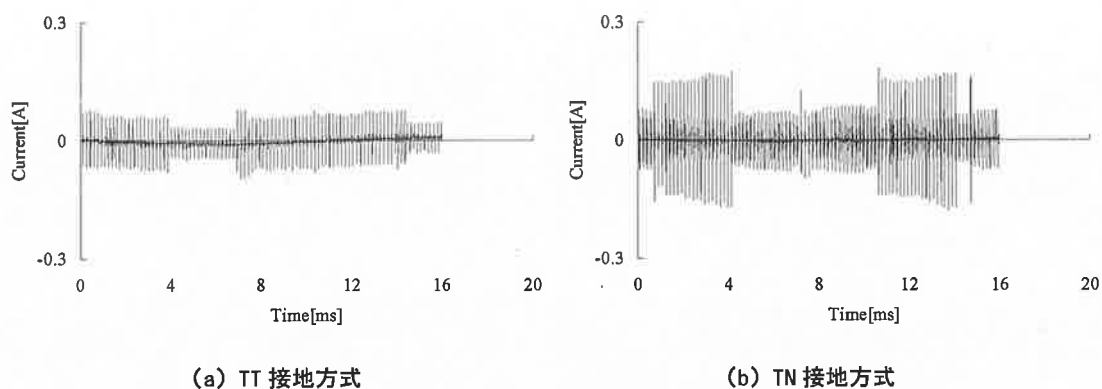


図 4-8 インバータの接地線電流波形

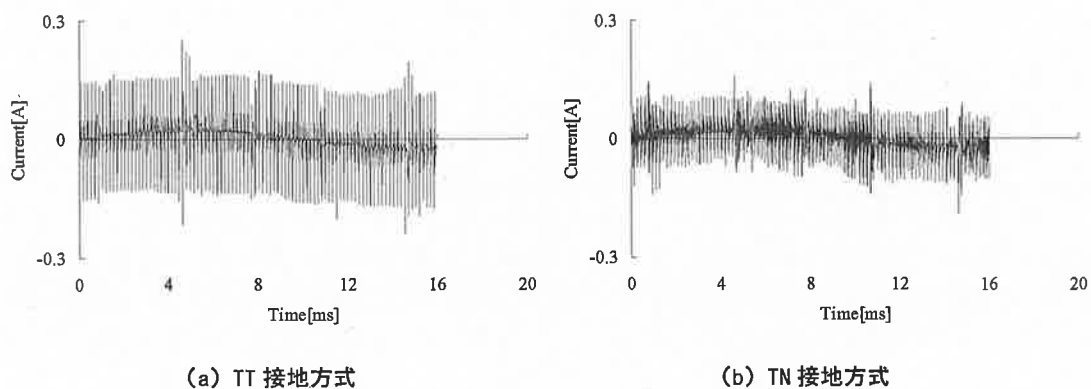


図 4-9 単相 3 線配線方式の零相電流波形

4.2.2 実験結果に対する考察

(1) TT 接地方式における高周波電流

TT 接地方式では、中性相と対地間に発生する零相電圧、およびインバータが設置されている配線系統以外への高周波電流が増加した。この零相電圧や高周波電流の周波数は、インバータのスイッチング周波数が主成分となるため、スイッチング周波数に着目し、さらに解析を行った。

図 4-10 に、図 4-2 (a) の中性相の対地電圧、図 4-3 (a) の B 種接地線電流、図 4-5 (a) のインバータの電源側の零相電流、図 4-9 (a) の単相 3 線配線方式の零相電流の時間軸を拡大した波形を示す。位相の基準は、図 4-10 (d) に示す中性相の対地電圧とした。電圧と同位相となるのは、図 4-10 (b) に示すインバータの電源側の零相電流であった。ここには示していないが、インバータの負荷側の零相電流及び誘導電動機の接地線電流も同様の傾向を示した。これに対し、反転した位相となるのは、図 4-10 (a) の B 種接地線電流、および図 4-10 (c) の単相 3 線配線方式に設置しているキャパシタンスを介して流れる電流であった。インバータの接地線電流も同様の傾向を示した。B 種接地線電流以外の電流波形は、スパイク状の波形が観測され、

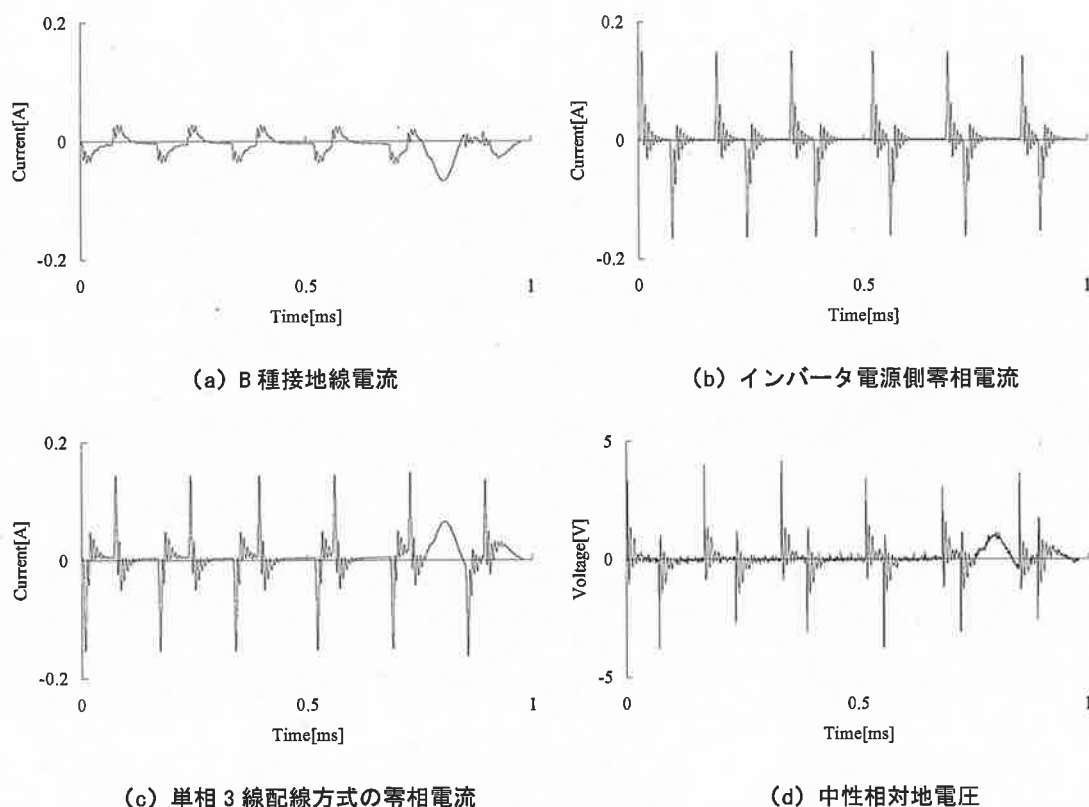


図 4-10 各箇所の電流と中性相と対地間電圧波形

スパイク波形が発生した後、減衰振動した。B 種接地線電流波形は、スパイク状の波形が確認されないが、同じ位相で電流が立ち上がり、その後、減衰する傾向を示した。

図 4-11 は、中性相の対地間電圧と各電流の位相を検討し、考えられる流れをまとめたものである。インバータから発生した高周波電流は、誘導電動機を介して、構造体に流れる。その後、一部はインバータの専用接地線を介して、インバータ本体に戻る。また、大部分は B 種接地極や、単相 3 線配線方式の対地静電容量を介して零相電流として流れ、インバータに戻る経路となる。つまり単相 3 線配線方式の高周波電流は、負荷側から電源に向かって流れる方向となる。

実際の配線方式と実験システムでは、構造体となる接地線のインピーダンス、ケーブル長さの条件が異なる。図 4-12 は、実際の電気設備を想定した回路インピーダンスの周波数特性である。2 μF のフィルタとケーブルインピーダンスを考慮した場合とフィルタを考慮しない場合を示している。いずれの場合も、共振や反共振は確認されない。対象とする数 kHz から高周波電流の場合、実際の電気設備の構成において共振回路が構成される可能性が無いことから、実験システムを用いて得られた結果は、実際の電気設備においても同様の傾向を示すと考えられる。

TT 接地方式を採用する場合、中性相と対地間に、B 種接地線に流れる電流と B 種抵抗による

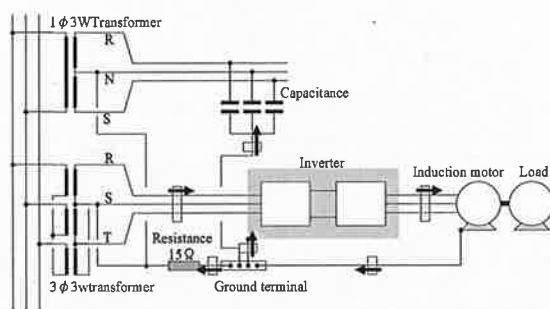


図 4-11 TT 接地方式における高周波電流の流れ

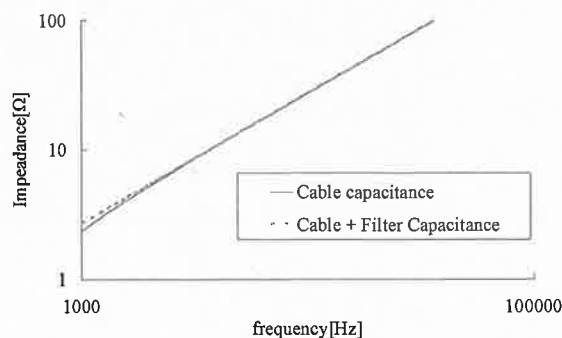
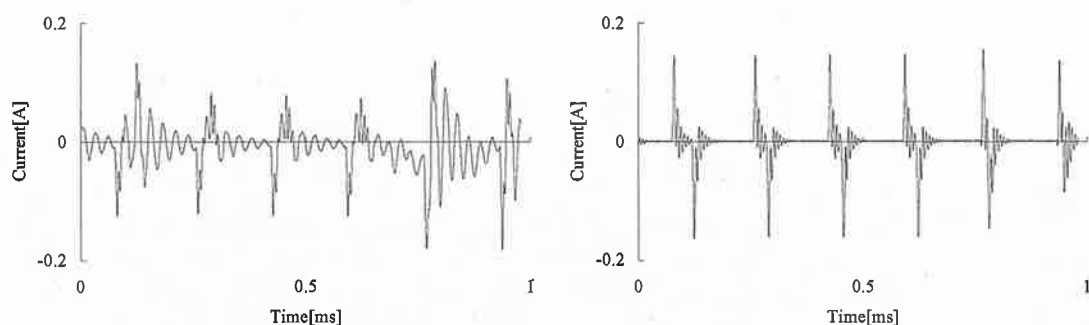


図 4-12 ケーブルサイズ 8mm² の場合における周波数とインピーダンス

電圧が発生する。この電圧によりインバータが設置されていない系統へインバータから発生する高周波電流が流れる。この電流を防止するためには、B 種接地極を電圧種別毎に分離すること、絶縁変圧器を設置することなどが対策となる。

(2) TN 接地方式における高周波電流

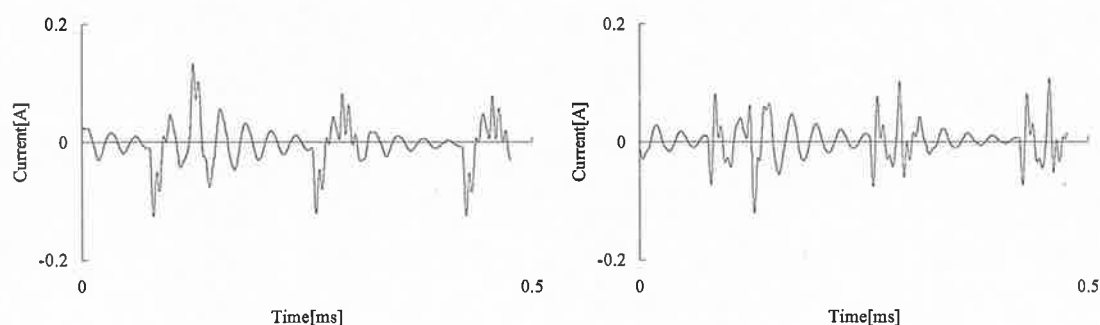
図 4-13 に代表的な箇所の電流波形を示す。TN 接地方式の場合、中性相の対地電圧がほぼ零であり、位相の基準となるものが無いため、電流の同時測定を実施した。図 4-13 (b) に示すインバータの電源側における零相電流の位相に対して、図 4-13 (a) の B 種接地線電流の位相は反転している。インバータの電源側の零相電流は、スパイク状の波形が発生した後、減衰振動する。B 種接地線電流も同様に減衰振動するが、インバータの電源側における零相電流の減衰振動と比較し、振動周波数は低く、減衰傾向が異なっている。B 種接地線電流と単相 3 線配線方式の零相電流波形を詳細に比較するため、時間軸を拡大した結果を図 4-14 に示す。図 4-14 (a) の B 種接地線電流の減衰振動波形に対して、図 4-14 (b) の単相 3 線配線方式の零相電流



(a) B 種接地線電流

(b) インバータ電源側零相電流

図 4-13 各箇所の電流波形



(a) インバータ電源側零相電流

(b) 単相 3 線配線方式の零相電流

図 4-14 各箇所の電流波形

の減衰振動波形は位相が反転しているものの、振動周波数や減衰傾向がほぼ一致している。これは、単相 3 線配線方式に設置されているキャパシタンスに高周波電流が流れ、キャパシタンスが充電された後、放電電流が発生するが、変圧器やケーブルのリアクタンスとの振動電流であると考えられる。この現象は、誘導電動機やインバータの接地線では確認できない。振動電流は、インダクタンスとキャパシタンスの条件によると考えられるが、単相 3 線配線方式には誘導電動機などの負荷が接続されていないことを考慮すると、負荷のインダクタンスによる影響が大きいと考えられる。

図 4-15 に TN 接地方式における電流の流れをまとめる。TT 接地方式と異なるのは、インバータの接地線電流の向きである。すなわち、インバータから発生する高周波電流のルートは図 4-16 に示すように二つあると考えられる。一つは、図 4-16 の点線で示すルートで、インバータから発生した高周波電流は、誘導電動機を介して構造体に流れる。その後、一部はインバータの専用接地線を介して、インバータ本体に戻るが、大部分は B 種接地極を介して、インバータの電源ケーブルの零相電流としてインバータ本体に戻る。もう一つは、図 4-16 の実線で示すルートで、インバータから発生した高周波電流は、インバータの専用接地線を介して構造体に流れる。その後、大部分は B 種接地極を介して、インバータの電源ケーブルの零相としてインバータ本体に戻る。このため、インバータの専用接地線には、実線と点線の合計された電流が流

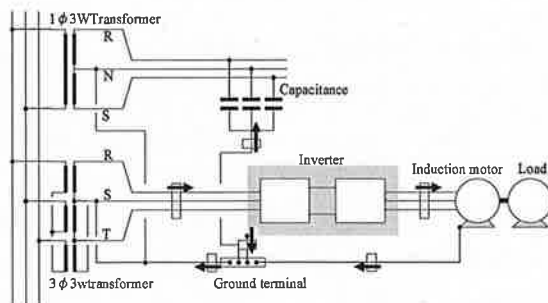


図 4-15 TN 接地方式における高周波電流の流れ

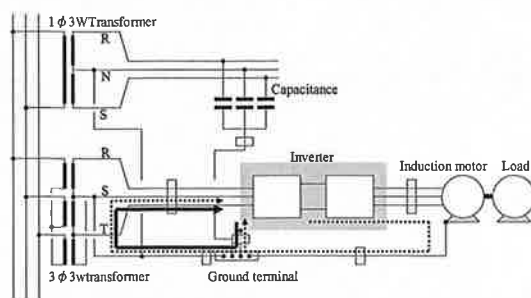


図 4-16 TN 接地方式の高周波電流の二つのルート

れることになる

TN 接地方式では、インバータのスイッチング周波数に起因する高周波電流の他系統への量が少なくなるが、B 種接地線に流れる電流は増加する。高周波成分を含むこの電流は、構造体を介して流れるため、この電流のルートにイミュニティの低い機器を近接させないことが肝要であり、かつインバータの電源側と負荷側のケーブルは対地に密着させ配線する必要がある。中性相と接地相を分離する TN-S 方式では、電源ケーブルと接地相は密着させる。また、単相 3 線配線方式に発生する高周波電流は小さくなるものの、インバータから発生する高周波電流の影響は無視できないと考えられる。

(3) TN 接地方式における高周波の振動電流発生条件

TN 接地方式の実験において、単相 3 線配線方式の零相電流と B 種接地線電流で発生した減衰振動電流について更に考察する。高周波電流や高周波電圧に起因する機器の誤動作などの障害は、瞬時値の大きさを低減することおよび機器の過熱や焼損事故は、実効値の大きさを低減することが必要である。このため、TN 接地方式の場合における単相 3 線配線方式の零相電流の減衰振動は、できるだけ減衰時間を短くしなければならない。これを検討するため、実験システムを等価回路で表し、その発生条件などについて検討した。

図 4-15 で示されている回路のうち、単相 3 線配線方式に設置されたキャパシタンス、変圧器やケーブルの抵抗とリアクタンスを考慮した等価回路は、図 4-17 となる。同図より、振動電流の発生条件は、高周波電流によりキャパシタンスが充電され、これを電源とした RLC 直列回路の過渡現象を解けばよい。この時の微分方程式は (4-1) 式となる。

$$Ri + L \frac{di}{dt} = \frac{Q}{C} \quad (4-1)$$

条件を整理して解くと (4-2) 式、(4-3) 式 および (4-4) 式が導かれる。

$$R^2 > \frac{4L}{C} \quad \text{のとき}$$

$$i = \frac{Q_0}{CL\beta} \varepsilon^{-\alpha t} \sinh \beta t \quad (4-2)$$

$$R^2 = \frac{4L}{C} \quad \text{のとき}$$

$$i = \frac{Q_0}{LC} t \varepsilon^{-\alpha t} \quad (4-3)$$

$$R^2 < \frac{4L}{C} \quad \text{のとき}$$

$$i = \frac{Q_0}{LC\gamma} \varepsilon^{-\alpha t} \sin \gamma t \quad (4-4)$$

ここで、それぞれの係数は以下となる。

$$\alpha = \frac{R}{2L}, \quad \beta = \frac{\sqrt{R^2 - \frac{4L}{C}}}{2L}, \quad \gamma = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

$$R = R_L + R_T + R_C, L = L_L + L_T + L_C$$

R_L	: 線路抵抗
R_T	: 変圧器の抵抗
R_C	: フィルタなどのキャパシタンスの直列抵抗
L_L	: 線路インダクタンス
L_T	: 変圧器のインダクタンス
C	: フィルタや対地静電容量によるキャパシタンス
Q_0	: キャパシタンスに充電される初期電荷

このうち、振動項があるのは (4-4) 式である。(4-4) 式の条件のうち、右辺はキャパシタンス成分となるフィルタや対地静電容量が μF 単位であること、インダクタンス成分となるケーブルや負荷機器、変圧器が mH 単位であることから、一般的に 1 より大きいと判断できる。これに対し、左辺は、TN 接地方式の場合、必ず 1 より小さくなる。このため、TN 接地方式において振動電流が発生した場合、その振幅は (4-4) 式より、インダクタンスもしくはキャパシタンスを大きくすることで振幅を抑制できる。電気設備の回路条件は、設計時点で明らかとなるので、回路シミュレーションを用いれば、(4-2) 式から (4-4) 式の条件を確認し、比較的簡単に減衰振動電流を求めることができる。

本研究に用いた実験システムの振動電流の発生条件について検討する。表 4-4 に回路条件を示す。これより (4-4) 式の条件式が成立する。先述したように一般的に TN 接地方式を採用した場合、振動電流が発生する条件が成立すると考えられる。

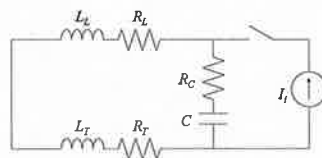


図 4-17 等価回路

表 4-4 機器やケーブルの定数

	Resistance [$\text{m}\Omega$]	Inductance [mH]	Capacitance [μF]
Cable	43.4 / 3	$2.9 / 3 \times 10^{-3}$	$2.5 * 3 \times 10^{-3}$
Ground wire	$19.3 * 2$	$1.7 * 2 \times 10^{-3}$	$3.8 * 2 \times 10^{-3}$
Transformer	145	0.73	—

4.3 直流配電に発生する雷撃時の過電圧

4.3.1 直流配電の一般的な雷対策

近年、地球温暖化等の問題から、風力発電設備や太陽光発電設備など、自然エネルギーを利用した環境に優しい発電方式が広く普及するようになった。特に太陽光発電設備は、省スペースで比較的効率良く発電することができるため、一般家庭の屋根や小規模ビルディングの屋上など、市街地等の人口密集地において広く利用されている。

一方、太陽光発電設備の普及とともに雷被害は増加し雷対策への関心が高まっている^{[58]-[60]}。太陽光発電設備の近傍に雷撃があった場合、誘導により雷サージが配線に発生すること、接地電位が上昇することでPCS等の各種機器に過電圧が発生し、PCS等が故障・誤作動することがある^[61]。モジュールの故障であれば経済的な負担は少ないが、PCSは高価であることが多く、故障の程度によっては発電が停止してしまうため影響は大きい。

これまでも太陽光発電設備の雷保護に関する研究^{[68]-[73]}がいくつか報告されている。[62]では、雷撃によるリスク評価を行い、サージ保護素子の設置、アレイや架台、PCS、近傍建築物との等電位化が必要であることが述べられている。[63]では、架台の反共振周波数による誘導電圧が太陽光発電設備のDC側配線に誘導する現象、また、[64]や[65]では、モジュールのフレームに流れる雷電流と内部配線に誘導する過電圧の関係について報告されている。これらの研究は、太陽光発電設備の一部のモジュールを取り出した基礎的な実験、簡略化したモデルを用いた解析が行われているだけで、実在する太陽光発電設備の形状、設置状況は様々で、これらの結果を直接的に適用することは困難である。[67]では太陽光発電設備の雷対策事例が紹介されている。ここでは避雷針による外部雷保護を推奨しているが、避雷針は影により発電効率が低下するため設置されない場合が多い。

太陽光発電設備に発生する雷過電圧は、モジュールの種類^[65]、架台や配線の施工方法、そして、接地システムに依存すると考えられる。実機設備を用いた耐雷実験はこれまで行われた例はなく、特に本節では、接地システムの構成が過電圧の発生に与える影響について検討した。

4.3.2 雷電流通流時の太陽光発電設備における過電圧の実験結果

(1) 実験回路

図 4-18 は実験回路を示している。インパルスジェネレータ（以下、I.G.と略す）は太陽光発電システムから約 100 m 程度離れて設置した。I.G.は容量 $0.5 \mu\text{F}$ のコンデンサに充電した電荷を、ギャップスイッチを用いて放電する機構となっており、本実験では I.G.の充電電圧を約 10 kV とした。電流注入線は、断面積 5.5 mm^2 の絶縁電線とし、ビニルパイプを支持材に用いて大地から 1 m 程度の高さに布設した。注入線は屈曲点によるサージ電流の反射を避けるため、曲がりが必要な部分はなめらかな円弧を描くように布設した。I.G.の接地線は、I.G.の近傍に設置されている鉄塔の接地に接続した。

アレイの近傍には配線を集約する配電盤がある。配電盤から建物内にある PCS への配線は、電源用には断面積 8 mm^2 の架橋ポリエチレンケーブルが用いられている。PCS がある建物と配電盤のそれぞれの接地は断面積 5.5 mm^2 の絶縁電線で接続されている。アレイと配電盤も、同じ絶縁電線を用いて連接接地されている。すなわち、アレイ、配電盤、PCS がある建物の接地は全て接続されていることになる。

図 4-19 は、アレイの外観を示している。太陽光発電システムは、12 個のアレイから構成されている。アレイは、単結晶モジュール（最大出力 65 W，最大出力電圧 21.3 V，最大出力電流 3.05 A）が 10 直列で構成されている。サージ電流の注入線は 500Ω の抵抗を介し、アレイ No. 12 のモジュールフレームに接続した。実際の雷がアレイに着雷した場合、雷の雷道は大地に垂直な方向となる場合が多い。ここでは実験の制約上、大地に平行な方向に注入線を配置し、電流を注入している。このように実際の雷道とは異なる方向から電流を注入しており、そこから発生する電磁界の影響が懸念される。これは 4.3.3 (2) の説明にもあるように、正・負極側配線間の電圧に影響を及ぼすと考えられる。しかしながら、正・負極配線対地電圧は主に接地の電位上昇に影響することが明らかとなっており、上記のような注入線を伝搬する電流から

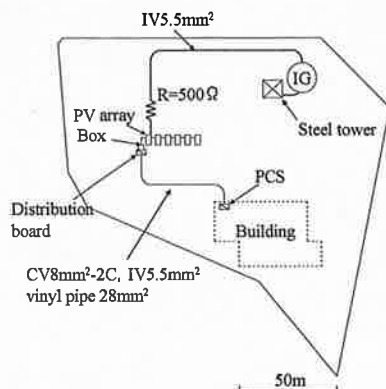


図 4-18 実験回路。

の誘導の影響は小さいものと考えられる。

図 4-20 (a) は、アレイの接地システムを示している。2つのアレイごとに長さ 1 m の棒状電極が布設されている。この棒状電極は断面積 2 mm^2 の絶縁電線を介して架台に接続されている。また、アレイの架台は、断面積 2 mm^2 の絶縁電線を介して相互に接続されている。表 4-5 は、各架台およびそれに隣接する各棒状電極の接地抵抗値を示している。接地抵抗測定は、横河電機製 323501 で電位降下法を用いて行った。架台の接地抵抗は、 14Ω から 30Ω の間でばらつきが見られ、棒状電極の接地抵抗は、この値の 10 倍程度であった。表 4-6 は各設備の接地抵抗値である。アレイ全体の合成接地抵抗は、 14Ω であるが、配電盤の接地抵抗が 0.5Ω と低いため、アレイ全体と配電盤を合わせた太陽光発電設備全体の接地抵抗は、配電盤の接地抵抗値にほぼ等しく 0.5Ω となった。なお、本実験場の大地構造は、三層構造であり地表面から深さ 0.5 m までの層は、大地抵抗率 $190 \Omega\text{m}$ 、深さ 0.5 m ~ 1.3 m の層では、大地抵抗率 $180 \Omega\text{m}$ 、深さ 1.3 m 以下では、大地抵抗率 $50 \Omega\text{m}$ であった。図 4-20 (b) は、アレイの配線状況を示している。アレイから配電盤への正・負極側配線は断面積 5.5 mm^2 の単芯 CV ケーブル 2 本とし断面積 22 mm^2 の金属管で保護されている。図 4-20 (c) は、アレイから配電盤の手前に設置されている集約ボックスまでの金属管の布設状況である。このような金属管に配線が収められているため、直流配線は誘導の影響を受けにくくなっている。図 4-20 (d) は、集約ボックスと配電盤の状況である。集約ボックスと配電盤間では、ビニル配管内に断面積 5.5 mm^2 の絶縁電線が収納されている。計測対象となるアレイの直流配線は、配電盤にて離線し、正極と対地間、負極と対地間のそれぞれについて過電圧の計測を行った。それらの過電圧は、Textronix 社製高電圧プローブ P5100（周波数帯域 DC~500 MHz、最大入力電圧 2.5 kV）を用いて計測した。電流は、注入線の太陽光発電設備側に Pearson 社製カレントトランス 2878（周波数帯域：300 Hz~200 MHz）を設置し測定した。計測には Textronix 社製バッテリー駆動型オシロスコープ TDS3054C（周波数

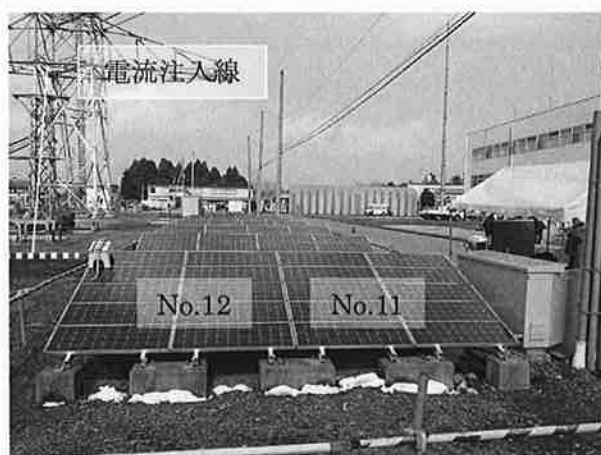


図 4 - 1 9 太陽光発電設備の外観

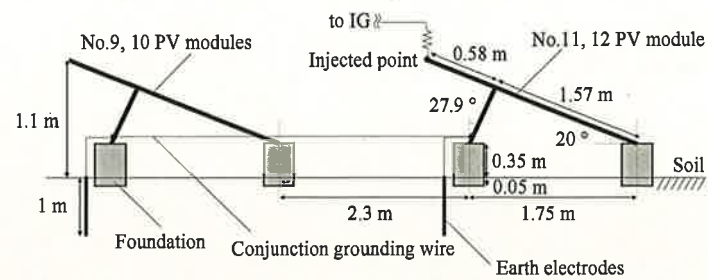
帯域 DC～500 MHz, サンプル・レート 5 GS/s) を用いた。以上のように 10 ns 程度の立ち上がりを十分に測定できる測定機器を用意し, 計測を行った。

表 4-5 アレイの接地抵抗.

Array No.	Support structure[Ω]	Earth electrode[Ω]
11, 12	14	300
9, 10	16	120
7, 8	16	300
5, 6	30	250
3, 4	30	300
1, 2	30	250

表 4-6 各種設備の接地抵抗

Equipment	Resistance value[Ω]
PV arrays	14
Distribution board	0.5
PV arrays and distribution board	0.5
Steel tower	1.8



(a) アレイの接地



(b) 配線の状況



(c) 配管の状況



(d) アレイと配電盤の状況

図4-20 アレイの設置状況

(2) 実験結果

ここでは、各アレイの棒状接地電極、架台及び配電盤の接地が相互に接続された場合を統合接地（図 4-21）、各アレイと棒状接地電極および集約ボックスは接続されており、図 4-21 に示す集約ボックスから配電盤間を接続する絶縁電線が離線された場合を単独接地と呼ぶこととし、それぞれについて実験を行った。

図 4-22 は、注入された電流波形である。注入電流は、 $0.35\mu\text{s}$ で最大値となる急峻波とした。 $t = 0.35\mu\text{s}$ で注入電流は最大値 18.4 A となった。

(2) - 1 単独接地の場合

図 4-23 に電流注入時に計測されたアレイ No. 10 における正・負極側の各配線対地および正・負極側配線間の電圧波形、図 4-24 に No. 12 における同様の結果を示す。

アレイ No. 10 の正極側配線には、図 4-23 (a) に示すような容量性の傾向を示す対地電圧が発生した。電圧最大値は 270 V ($t = 5.5\mu\text{s}$) であり、波頭は注入電流よりもなだらかとなった。その後、測定時間内の $t = 80\mu\text{s}$ まで一定値 275 V を推移した。負極側配線対地電圧（図 4-23 (b)）も、若干の差異はあるものの、正極側配線と同様の過電圧波形となった。正極側配線と負極側配線間の電圧（図 4-23 (c)）は、最大値 20 V ($t = 0.2\mu\text{s}$) の過電圧が発生したが正・負極側配線対地電圧値に比べて小さい値であった。

アレイ No. 12 では、図 4-24 (a), (b) に示すようにアレイ No. 10 に比べて大きな正・負極側配線対地電圧が発生した。電圧最大値は 290 V であり、アレイ No. 10 と同様、電流注入後、 5.5

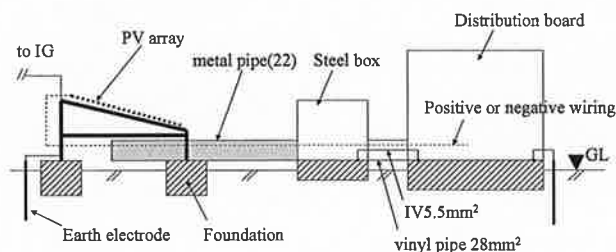


図 4-21 集約ボックスと配電盤間の接地

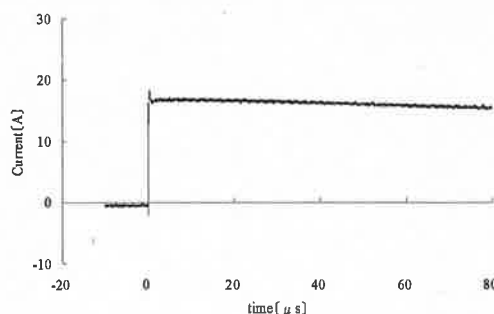


図 4-22 注入電流波形

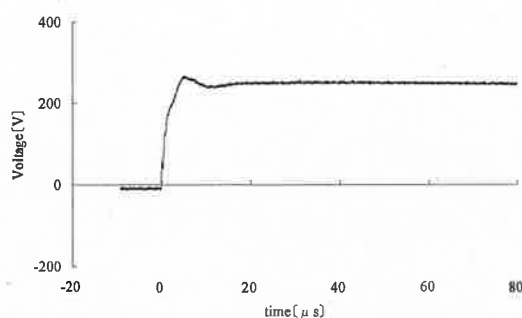
μs 経過したときに最大値を示した。その後、測定時間内の $t = 80 \mu\text{s}$ まで一定値 270 V を推移した。このように、図 4-23 (a), (b) と図 4-24 (a), (b) は類似した波形となった。アレイ No. 12 の正・負極側配線間電圧 (図 4-24 (c)) は、アレイ No. 10 よりも大きく最大値 70 V ($t = 0.2 \mu\text{s}$) となった。

(2) - 2 統合接地の場合

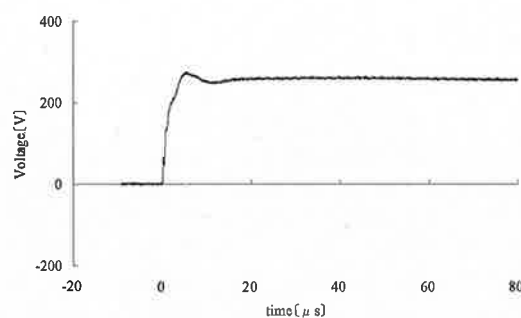
図 4-25 は電流注入時に計測されたアレイ No. 10 の正・負極側配線対地および正・負極側配線間の電圧波形、図 4-26 にアレイ No. 12 における同様の結果を示す。

アレイ No. 10 では、電流注入後、図 4-25(a), (b) に示すような誘導性の減衰振動する過電圧が、正・負極側配線対地間に発生した。電圧最大値は 90 V ($t = 0.7 \mu\text{s}$) であった。その後、測定時間内の $t = 80 \mu\text{s}$ まで正極側配線対地電圧は一定値 3 V 、負極側配線対地電圧は -5 V を推移した。正・負極側配線間の電圧を図 4-25 (c) に示しているが、最大値 30 V ($t = 0.2 \mu\text{s}$) の過電圧となった。

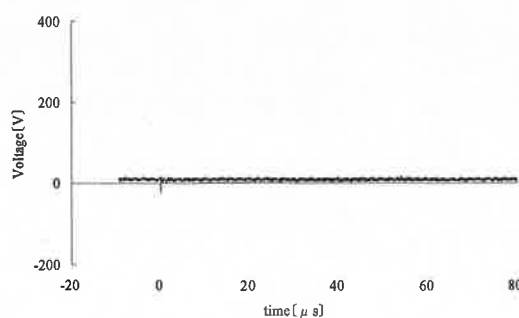
アレイ No. 12 で発生した過電圧波形はアレイ No. 10 で発生したものと同様に減衰振動する過電圧となった。図 4-26 に示すように、正・負極側配線対地電圧の最大値は 110 V ($t = 0.7 \mu\text{s}$)、



(a) 正極と対地間の電圧



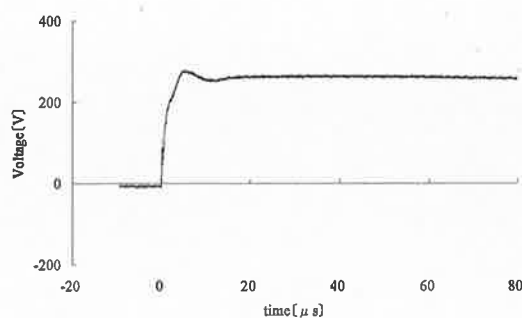
(b) 負極と対地間の電圧



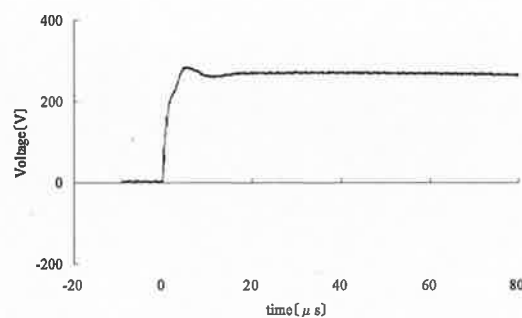
(c) 正極と負極配線間の電圧

図 4 - 2 3 アレイ No. 10 の過電圧

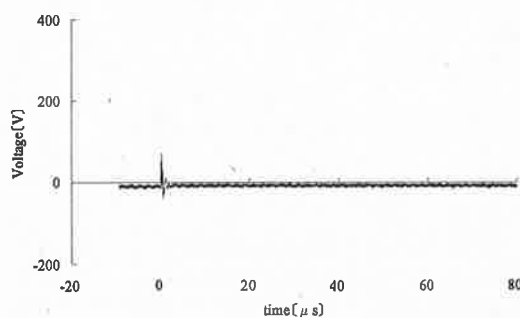
その後、測定時間内の $t=80\ \mu\text{s}$ まで正極側配線対地電圧は一定値 16 V、負極側配線対地電圧は一定値 9 V を推移した。正・負極側配線間電圧の最大値は 70 V ($t=0.2\ \mu\text{s}$) であり、アレイ No. 10 に比べて大きくなった。



(a) 正極配線と対地間の電圧

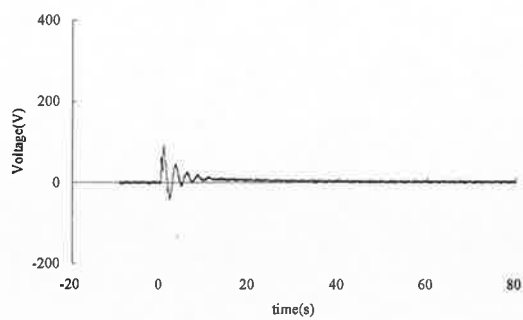


(b) 負極配線と対地間の電圧

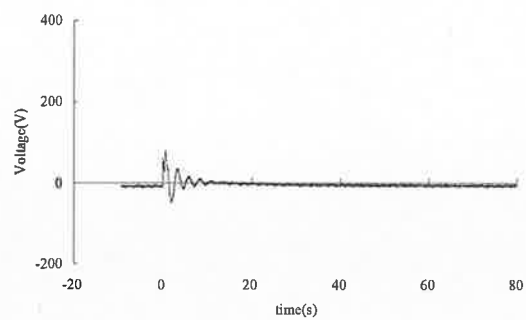


(c) 正極と負極配線間の電圧

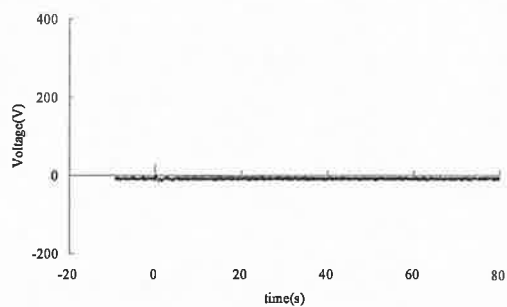
図 4-24 アレイ No. 12 の過電圧



(a) 正極配線と対地間の電圧

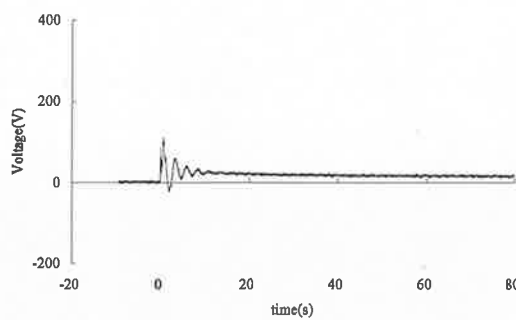


(b) 負極配線と対地間の電圧

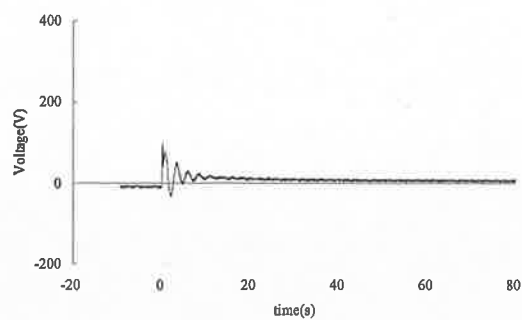


(c) 正極と負極配線間の電圧

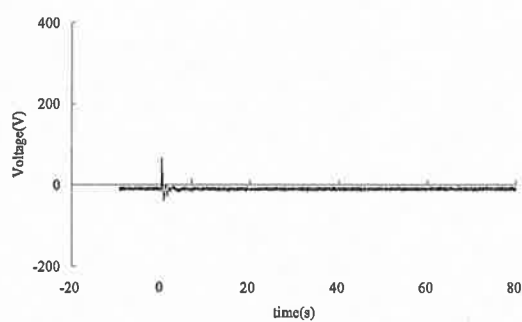
図 4-25 アレイ No. 10 の過電圧



(a) 正極配線と対地間の電圧



(b) 負極配線と対地間の電圧



(c) 正極と負極配線間の電圧

図 4-26 アレイ No. 12 の過電圧

4.3.3 結果検討

(1) 接地システムの構成

単独接地，統合接地の影響について考察する。単独接地ではアレイに電流が注入され，その電流が架台を通して大地に流出し，架台の電位が上昇する。架台と集約ボックスの接地は金属管により相互接続されているが，配電盤は電氣的に切り離されている。このためサージ電流が注入され架台の電位が上昇すると，配電盤の電位は，架台からの距離と大地抵抗率によって決まる電位分布により上昇する。また，正・負極側配線の電位は架台と正・負極側配線間の電磁・静電結合に関係して電位上昇する。このような配電盤の電位上昇と正・負極側配線の電位上昇の差が正・負極側配線対地電圧として現れた。アレイ相互は金属管や絶縁電線で接続されているため，各アレイから配電盤に引き込まれている正・負極側配線の対地電圧波形は同様の傾向となった。

統合接地した場合でも，正・負極側配線対地電圧の波頭部では，誘導や過渡的な接地電位上昇の影響で比較的大きな過電圧が現れた。その後，減衰振動し $10\ \mu\text{s}$ 経過するとほぼ定常値となり，波尾では単独接地に比べて早く過電圧が収束した。統合接地の場合，架台，集約ボックス及び配電盤の接地は，金属管や絶縁電線で相互接続されている。このためサージ電流が注入され，架台が電位上昇すると，配電盤の接地も架台と同様の電位となる。正・負極側配線の電位も架台と正・負極側配線間の電磁・静電結合により架台と共に電位上昇するため，正・負極側配線対地電圧は単独接地の場合に比べて小さくなった。また，単独接地の場合，太陽光発電設備単独の定常的な接地抵抗値は表 4-5 より $14\ \Omega$ ，それに対し，統合接地の場合， $0.5\ \Omega$ となる。これらの接地抵抗は波尾部での架台や配電盤の電位に影響を与える。このような接地抵抗の低下も，正・負極側配線対地電圧の低下に影響しているものと考えられる。

定常的な接地抵抗の影響を確認するため，統合接地の場合における架台および配電盤の電位を計測した。配電盤と建物内に設置されている PCS は絶縁電線で接続されているため，この絶縁電線を配電盤側で離線し，電圧基準線として用いた。計測系は，2.1 節と同様のものを用いた。図 4-27 (a) は統合接地の場合における架台の電位上昇，図 4-27 (b) はその電位を注入電流で除して得られた抵抗値である。電位の最大値は， $250\ \text{V}$ ($t=0.5\ \mu\text{s}$) となった。最大値が発生した直後は振動が見られるが，その後，振動は減衰した。この電位を印加電流で除して得られた抵抗値は，最大値 $15\ \Omega$ ($t=0.5\ \mu\text{s}$) となり， $60\ \mu\text{s}$ を経過すると $0.5\ \Omega$ へと収束し，表 4-5 に示す架台と配電盤の合成抵抗 $0.5\ \Omega$ と一致した。このような架台や配電盤の電位上昇が原因で太陽光発電設備の正・負極配線対地電圧が発生したと考えられる。

統合接地により，モジュールの正・負極側配線対地電圧の波尾が低減することは，SPD (Surge Protective Device) などのサージ保護素子のストレス軽減につながる。したがって，太陽光発電システムのアレイや周辺の配電設備を統合接地することは耐雷設計上，有効であると考えられる。

配電盤とアレイの統合接地は積極的に進めるべきである。

モジュールの正・負極側配線間に現れた過電圧最大値は単独・統合接地の場合で大きな差異は現れなかった。これは、架台や配電盤の接地電位の上昇による影響ではなく、モジュール内部の配線や各モジュールから配電盤までの配線に誘導した電圧が影響したものと考えられる。本実験のシステムでもすべての配線が接地システムと連接接地された金属配管に収まっているわけではなく一部露出配線の部分があり、そのような部分への誘導が影響したとも考えられる。

なお、架台や配電盤とモジュール内部配線との静電・電磁結合については、モジュールの種類や設置角度、架台・配管の設置位置により異なる。このような多種多様な設備における雷過電圧発生様相については FDTD 法 (Finite-Difference Time-Domain Method) 等の数値電磁界解析手法を用いて検討することが有効であると考えられ、今後の課題である^[68]。

(2) 配線への誘導

正・負極側配線間に発生する過電圧について追加実験を行った。モジュール内部配線および直流配線の影響を確認するため、図 4-28 の点線で示すようにアレイ No. 12 周辺部に断面積 5.5 mm^2 の絶縁電線を布設し、配電盤までその絶縁電線を引き込み、その線間に発生する過電圧を測定した。アレイから配電盤までの配線は相互に密着させた状態で既設の金属管に固定した。接地方式は統合接地としている。注入電流波形は図 4-22 に示したものと同一であり、注入点はこれまでの実験と同じくアレイ No. 12 のモジュールのフレームである。測定系についても 2.1 節に示すものと同様である。

図 4-29 に測定結果を示す。過電圧の最大値は 190 V ($t = 0.5 \text{ } \mu\text{s}$) であり、最大値が発生した後、振動を伴う減衰波形となった。図 4-26 (c) の最大値は 70 V ($t = 0.2 \text{ } \mu\text{s}$) であるため、これと比べると図 4-29 で得られた過電圧の最大値は大きく、さらに発生する時間が遅れていた。図 4-30 は、実験で用いたモジュールの内部配線の状況を示しており、本実験で用いたモジュールはセル同士が 2 本の配線により直列接続されている。このため、注入した電流によって発生する誘導電圧に影響する面積は図中の 1 点鎖線で囲われる部分となり、この配線で囲われる

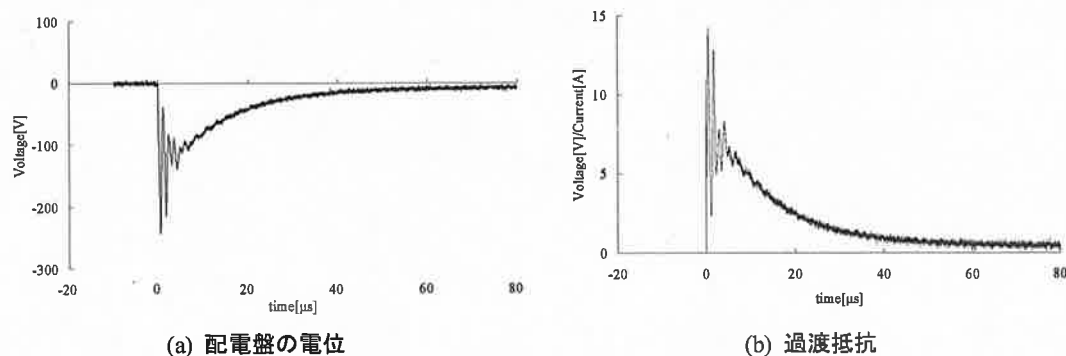


図 4-27 過渡的な接地抵抗.

面積は約 0.12 m^2 となる。モジュール全体の面積は約 0.51 m^2 であるため、1 点鎖線で囲われる面積はモジュール面積に対しておおよそ 0.24 倍となる。図 4-29 で発生した過電圧の最大値 190 V を 0.24 倍すると 46 V となる。これは図 4-26 (c) の最大値 70 V よりもやや小さくなった。図 4-31 にモジュール間の配線状況を示す。この配線によって囲われる面積にも架台上を伝搬する電流により発生する磁束が鎖交するため、残りの 24 V が発生したと考えられる。これは正負極側配線間に発生する過電圧の 34 % を占めている。モジュール間を接続する配線は、工場加工品であるため現地でこの配線で囲われる面積を減少させることは困難である。以上の結果から、正負極側配線間に現れる過電圧を完全に除去することは難しいことが分かった。



図 4 - 2 8 絶縁電線の布設状況.

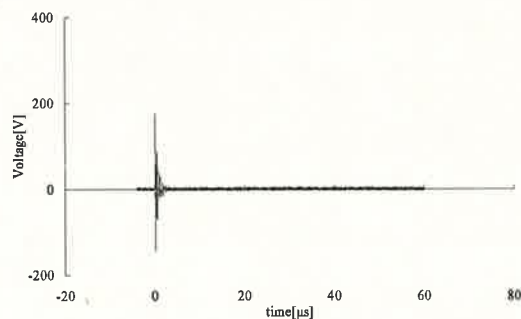


図 4 - 2 9 アレイ No. 12 の正極と負極配線間の電圧

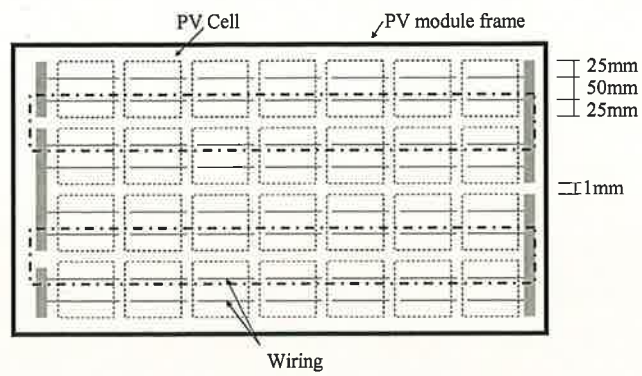


図 4 - 3 0 モジュール内部配線



図 4 - 3 1 モジュール間の配線

(3) 実際の雷撃を想定した過電圧

単独接地と統合接地を比較すると、正・負極側配線対地電圧の波尾における減衰の状況が大きく異なり、統合接地にした方が軽減できる。一方、線間電圧に大きな差異はなく、最大でも 70 V であった。しかしながら、本試験で注入された電流は、試験設備の仕様にもより 18.4 A と実際の雷撃電流と比較すると小さい。

本試験電流のしゅん度は、図 4-22 より $18.4 \text{ A}/0.35 \mu\text{s}$ である。これは波頭長 $1 \mu\text{s}$ 、波高値 52 A の電流を注入した場合に相当する。このとき発生する太陽電池アレイの正負極側配線間に発生する過電圧(図 4-26(c)に示す統合接地でアレイ No. 12 の場合)が、70 V である。JIS C 0367-1 では後続雷撃の電流の雷保護レベル I の平均しゅん度は $200 \text{ kA}/\mu\text{s}$ と設定されている。これまでの実験結果から、この後続雷撃に相当する電流がアレイ No. 12 のフレームに注入された場合、アレイ No. 12 の正負極側配線間に発生する過電圧は 270 kV となることが予想される。10 直列に接続されたアレイであれば、モジュール当り 27 kV が印加されることとなる。この電圧は、モジュール内部配線やモジュール相互を接続する配線により発生する電圧であるため、金属管保護や配線などの施工面での保護はできない。JIS C 8918:1998 などにおいてモジュール耐電圧試験の試験電圧は 4.5 kV ($1.0 \sim 1.2/40 \sim 50 \mu\text{s}$)、JIS C 8980:1997 では PCS 耐電圧試験の試験電圧は 5 kV ($1.2/50 \mu\text{s}$) と定められており、このことから SPD による保護が必要である。

正負極側配線対地電圧の最大値は連接接地した場合でも 110 V となった。この時の電流値は 18.4 A であり、5.9 V/A の過電圧が発生することが分かった。同様な雷撃電流 200 kA を想定すると、本研究の実験で用いた太陽光発電システムにおいて、定常領域においても 100 kV の過電圧が加わることになり、これについても SPD 等を用いて適切に保護する必要がある。

4.4 まとめ

電圧形インバータのスイッチング周波数に起因する高周波電流について、実際の電気設備を想定した実験システムを構築し、TT 接地方式及び TN 接地方式における、高周波電流の様相を明らかにした。また、TN 接地方式では、他系統に廻り込む電流に減衰振動が確認され、その発生条件について検討し、以下のことを明らかにした。

- (2) TT 接地方式を採用する場合は、インバータが設置されていない系統の機器の電流耐量の検討を行う必要があると考えられる。TT 接地方式では、中性相と対地間に電圧が発生し、これによりインバータが設置されていない系統において対地静電容量などを介して電流が流れるためである。実験に用いた回路では TT 接地方式の場合、TN 接地方式と比較して約 1.4 倍の零相電流となる。実際の電気設備では対地静電容量の大きさが増加することと予想されるので更に大きくなるものと考えられる。
- (3) TN 接地方式を採用する場合は、TT 接地方式と比較しインバータが設置されていない系統への影響は軽減するものの、構造体を介して B 種接地線に流れ込む高周波電流が増加するので、誘導障害を考慮した設計施工が重要である。これは、TT 接地方式における B 種接地抵抗に相当する部分がほぼ零となるからである。実験に用いた回路では TN 接地方式の場合、TT 接地方式と比較して約 1.9 倍の電流となる。実際の電気設備では他系統の対地静電容量が増加するので、これ以下であると考えられる。
- (4) TN 接地方式の場合、TT 接地方式のような B 種接地抵抗に相当するものが無いこともあり、フィルタやケーブルの対地静電容量によるキャパシタンスにより振動電流が発生する恐れがある。
- (5) TN 接地方式では一般的に振動電流が発生する条件が成立する。この振動電流は負荷機器などのインダクタンスの増加により減衰する傾向がある。実際の電気設備では、負荷機器の接続数が少ない電源投入初期の段階において発生する可能性があると考えられる。

なお、IT 接地方式は、TT 接地方式における B 種接地に相当する部分が、開放もしくは高抵抗となるものである。日本国内ではキャパシタンスによる接地方式が用いられており、電圧階級により容量が決定され、最大で 16 μF のキャパシタンスが設置される。この場合、(4-4) 式は成立しないため、共振や振動電流が発生することはない。

以上から、直流配電を考慮した電気設備において、IT 接地方式が優れた方式であると考えられる。

次に、太陽光発電システムの雷対策に効果的な施工方法を見出すことを目的として、実機システムに急峻波電流を注入する実験を行った。架台を含めたアレイの接地とそれに隣接する配電盤の接地を個別接地した場合と接続した場合に、直流配線に発生する過電圧の測定等を行い、以下の項目を明らかとした。

- (1) 架台を含めたアレイの接地と配電盤の接地を接続することでそれらの間を行き来する電力線の対地電圧を軽減することができる。本実験設備では、単独接地の場合において電圧最大値は 290 V、統合接地の場合において 110 V となり、単独接地に比べて統合接地の電圧最大値は 38 %まで低減した。
- (2) 接続接地されることで電力線対地電圧の波尾部は大きく低減され、そこに設置するサージ保護素子の耐量を軽減できる。本実験設備では、測定時間内の $t = 80 \mu\text{s}$ において、単独接地において一定値 270 V を推移したのに対し、統合接地の場合、最大でも 16 V となり、単独接地に比べて統合接地の定常時間における電圧最大値は 6%まで低減した。このように、定常状態において大きな低減効果が見られた。
- (3) 接続接地したとしても架台等を流れる電流からの誘導により発生する直流配線の線間電圧は、大きく低減されることはない。本実験設備では、単独・統合接地のいずれの場合もアレイ No. 12 の直流配線の線間電圧は 70 V となり、低減効果は見られなかった。
- (4) 直流配線の線間に発生する過電圧は架台を流れる電流からの電磁誘導により発生し、配線を金属配管等に収めることでその大きさを低減できる。
- (5) 接続接地したとしても直流配線の対地電圧、線間電圧はサージ保護素子を省略できるほど小さくはなく、適切な耐量のサージ保護素子を設置する必要がある。JIS C 0367-1 では後続雷撃の電流の雷保護レベル I の平均しゅん度は $200 \text{ kA}/\mu\text{s}$ となり、アレイ No. 12 の正負極側配線間に発生する過電圧は 270 kV となることが予測される。

第5章 直流配電における過電圧の解析による検討

5.1 まえがき

太陽光発電設備に発生する雷過電圧は、モジュールの種類、架台や配線の施工方法、そして、接地システムに依存すると考えられる。十数 kW 程度の太陽光発電システムにおける接地システムは、ボンディング箇所が限られるため施工も簡単で管理がしやすい。しかしながら、数百 kW 以上の大規模太陽光発電所における雷対策は、SPD の設置箇所、ボンディング数が多くなり、その後の運用において管理者がその確認作業に時間を要する。このため、できるだけ効果的な雷対策の提案が重要となる。

筆者は、4.3節で既存のアレイのフレームにサージ電流を注入し、接地設備の構成が太陽光発電設備の直流配線側に発生する過電圧に与える影響について実験的検討を行った。本章では、4.3節で行った実験的検討を、数値電磁界解析の一つであるFDTD法（Finite - Difference Time - Domain method）を用いてその実験結果を再現し、過電圧の発生様相について解析的検討を行い、本手法の有効性について述べる。さらに、大規模直流配電の雷対策の検討に本手法を適用し、効果的な雷対策について検討した。

5.2 解析手法

太陽光発電設備に発生する過電圧の解析的検討を行うため、電磁界解析手法の一つであるFDTD法を用いた^[69]。本手法の他にも、有限要素法、モーメント法などがある^[70]。FDTD法は、マクスウェル方程式を用いて、電磁場を直接、計算する。計算対象が大きい場合でも、計算に用いるメモリが小さくて済むこと、電気回路モデルが多いことなどから、建築物や風力発電設備^[71]などの雷撃時の配線への誘導電圧の検討例などが多く報告されている。一方、モデルの誘電率など材質に関係する要素を入力しなければならないこと、空間や材料をセル分割するため、斜材をそのまま直接モデル化できないなどの問題がある。しかしながら電気設備に用いられている機器や資材の材質は、一般的にその生成材料が明らかである。過電圧の発生に影響を及ぼす大地抵抗率も実測が可能である。斜材については、計算時間やメモリを考慮できる限り忠実に再現することで、対応が可能であると判断した。

5.3 太陽光発電設備のモデルによる解析結果および検討

5.3.1 検討モデル

太陽光発電設備の直流配線に発生する過電圧の発生様相は、設備の配置、モジュール相互を接続する配線の種類・布設状態、アレイと配電箱間の配線の状態、モジュールのフレームや架台などのボンディングの状態に影響される。これらのうち、配線の布設やボンディングに関わるコストは設備全体のイニシャルコストに占める割合は小さいが、配線相互の密着や金属管による保護が無いと、直流配線間に発生する過電圧が拡大する。解析には、シミュレーションモデルや計算結果の妥当性を検証するため、4.3節で行った実験設備をモデル化した。解析は、

FDTD 法に基づく汎用サージ解析プログラム VSTL (Virtual Surge Test Lab.) を用いた。VSTL は (財) 電力中央研究所により開発され、ユーザインターフェースに優れたプログラムである。

図 5-1 に解析空間の全体図を示す。解析空間の刻み幅 Δs は、全ての方向で $\Delta s = 0.005 \text{ m}$ とし、解析空間の大きさは図 5-2 (a) に示すように x 方向 : 24.9 m , y 方向 : 8.275 m , z 方向 : 5.625 m とした。なお、解析空間を囲む 6 つの境界面は、Liao の二次吸収境界条件を用いて開空間を模擬した。本解析では、電流注入線の終端を Liao の二次吸収境界面に接続し、電流注入点は、実験と同様に No.12 アレイのフレームコーナー部とした。電流の注入は、電流注入点の直上とした。なお、電流源は試験時に測定した電流波形を用い、フレームとは抵抗 500Ω を介して接続した。図 5.2 は、解析モデルの詳細を示す。図 5-2 (a) はモデルの外観である。配電盤の接地抵抗は、アレイなどと比較して低い結果が得られている。これは遠方の建物と接続されているためである。本解析では、配電盤の解析モデルを実際の接地抵抗値を再現する為に、実寸に比べて比較的大きい直方体導体を大地に埋設した。図 5-2 (b) は内部配線の状況を示している。モジュールの内部配線やフレームは細線導体でできるだけ詳細にモデル化している。また、モジュール以外の、アレイを支える架台、コンクリート基礎、そして直流配線を保護する金属管は、忠実にモデル化した。

図 5-3 に金属管のモデルを示す。金属管内部は、実際の設備と同様に、アレイ二つ分の正極・負極配線をモデル化した。解析箇所は、実験と同様に正極・負極配線と配電盤間の電圧とした。

実験場の大地抵抗率を Wenner の 4 電極法により測定した。その結果、図 5-4 に示すように、地表面から 0.5 m までは $189.1 \Omega\text{m}$, $0.5 \text{ m} \sim 1.3 \text{ m}$ は $180 \Omega\text{m}$, 1.8 m 以降では $50 \Omega\text{m}$ の大地構造となっていることが明らかとなった。これより、図 5-1 に示す解析空間における大地の構造は図 5-4 を忠実に表現し、解析空間の底部から高さ 0.5 m までは $\rho = 189.1 \Omega\text{m}$ の物質, $0.5 \text{ m} \sim 1.3 \text{ m}$ までは $\rho = 180 \Omega\text{m}$ の物質, 1.8 m 以降は $\rho = 50 \Omega\text{m}$ の物質で満たしている。以上の解析条件において、解析空間内に模擬された太陽光発電システム、棒状接地電極、配電盤の定常接地抵

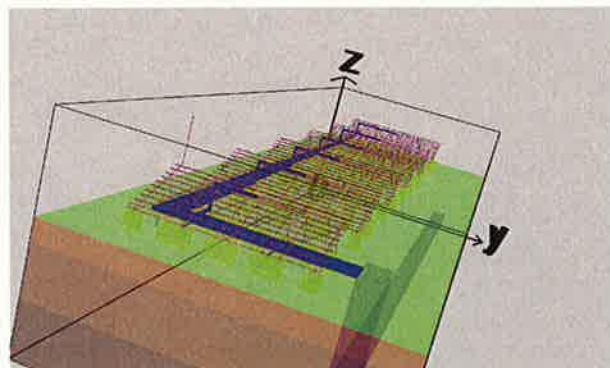


図 5-1 太陽光発電設備のモデル化

抗を、FDTD 法を用い個別に計算した。表 5-1 に実験と解析結果の比較を示す。実験ではアレイや棒状電極のそれぞれの接地抵抗値にばらつきがあるのに対し、解析では一定値となった。これは、実験に用いたアレイ周辺に接地抵抗値に影響を与える金属等の低抵抗な埋設物があることを示す。配電盤の接地抵抗やアレイと配電盤の合成接地抵抗は、実験と解析でよく一致した。

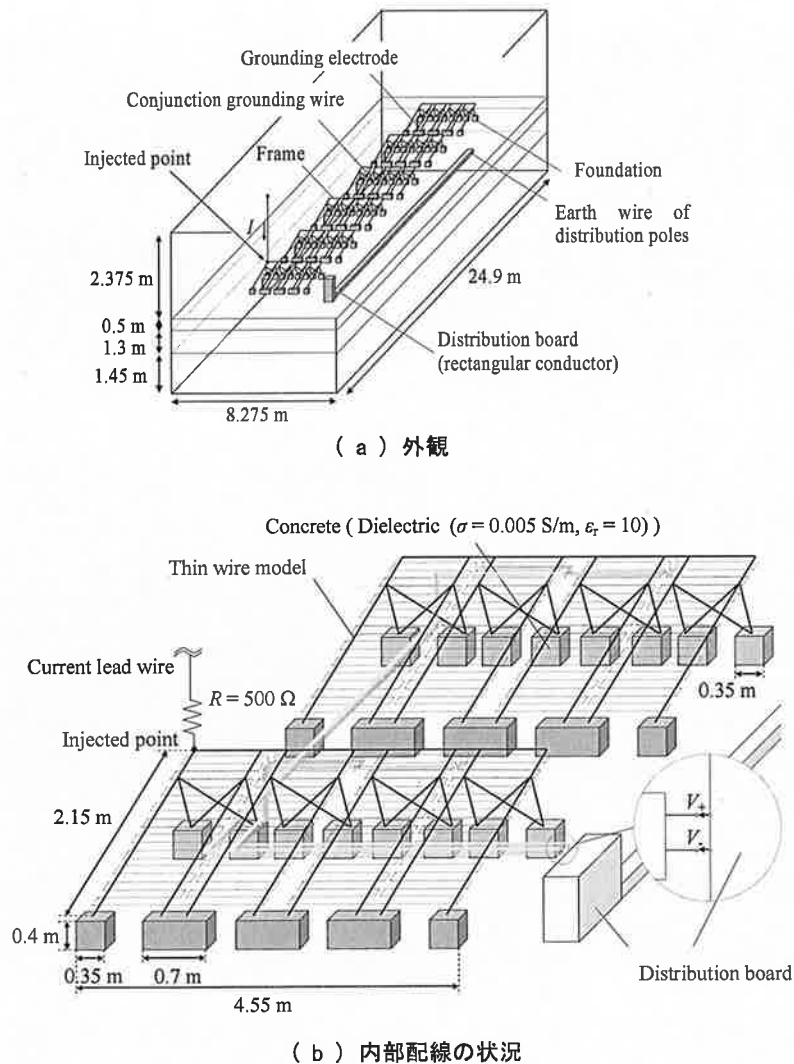


図 5-2 太陽光発電設備の詳細モデル

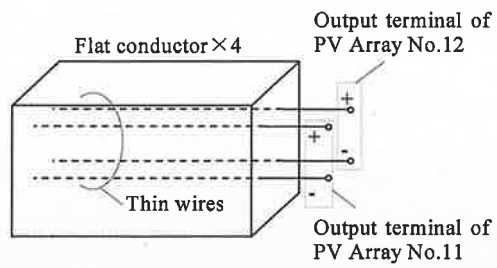


図 5 - 3 金属管のモデル

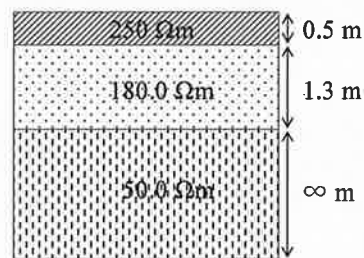


図 5 - 4 実験場の大地抵抗率

表 5 - 1 接地抵抗の測定値と解析値

	Experiment[Ω]	Calculation[Ω]
PV array	14 - 30	11
Earth electrode	120 - 300	260
Distribution board	0.52	0.5
PV arrays and distribution board	0.51	0.32

5.3.2 過電圧の解析結果と検討

(1) 実験結果と解析結果の比較

図 5-5 に実験と解析に用いた印加電流波形を示す。電流波形の波頭・波尾はできるかぎり忠実に再現した。図 5-6 に単独接地の場合における負極と対地間電圧の実験と解析結果の比較を示す。波頭部の立ち上がりの傾向は、実験と解析でよく一致した。さらに、実験結果で得られた最大値 335 V ($t = 0.25 \mu\text{s}$) に対し、解析結果では 330 V ($t = 0.25 \mu\text{s}$) とほぼ同様の結果が得られた。その後、実験結果と解析結果ともに過電圧は減少傾向を示すが、零にはならず 200 V 程度を推移した。また、解析結果では実験結果とは異なり、波尾部に振動性の電圧が発生した。

図 5-7 に統合接地の場合における負極と対地間電圧の実験と解析結果を示す。波頭部の立上りは実験結果と解析結果でよく一致しているが、最大値は、実験結果が 250 V ($t = 0.2 \mu\text{s}$) に対し、解析結果では 290 V ($t = 0.15 \mu\text{s}$) となり、やや異なる結果が得られた。その後、過電圧は減衰するが、その過程に異なる傾向が見られた。その後、実験結果では 9 V を推移したが、解析結果では -20 V となった。

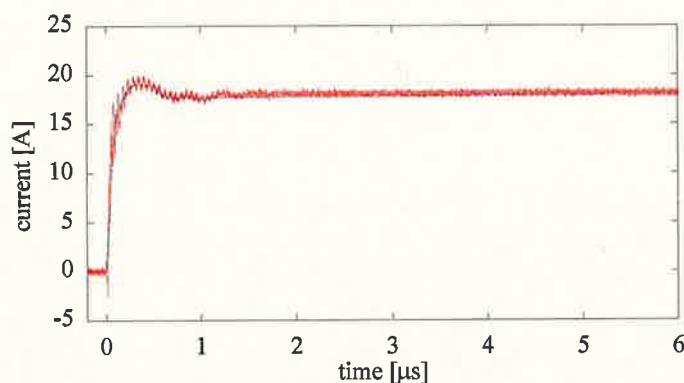


図 5-5 注入電流波形

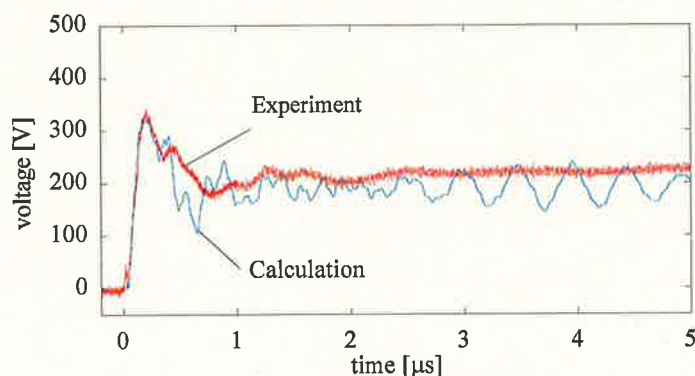


図 5-6 単独接地の場合

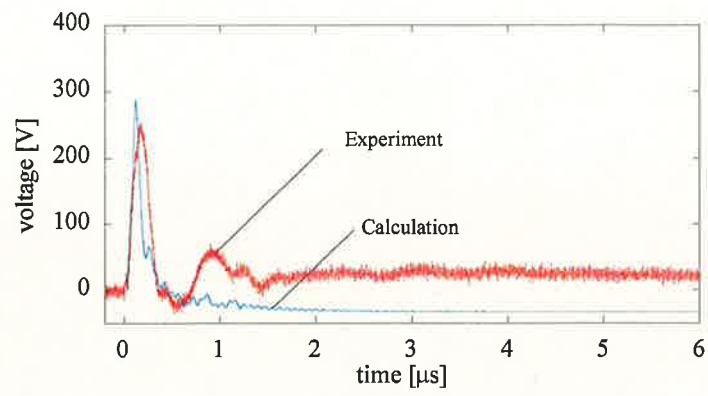


図 5 - 7 統合接地の場合

(2) 解析結果に対する考察

単独接地の場合、波頭部での最大値はよく一致する結果となった。しかしながら、波尾において実験結果では見られなかった振動性の過電圧が解析結果では発生した。振動周波数は、最大値が発生してから $2.5\ \mu\text{s}$ までが $5.5\ \text{MHz}$ 、 $2.5\ \mu\text{s}$ 以降が $2\ \text{MHz}$ と異なる結果となった。直流配線に発生する過電圧に振動性の周波数が発生する原因は、[63]などで報告されているが、直流配線の布設状態、モジュールの内部配線、架台の大きさや配線と架台等の構造物との静電容量に依存する。実験結果において振動性の周波数が確認されなかったことは、モジュール内部のセル面積、モジュール相互やモジュールと直流配線の接続に用いる材料の抵抗の影響が考えられる。

統合接地の場合、配線への誘導の影響と考えられる波頭部の最大値及び最大値となる時間、及び波尾の電圧推移に違いが見られた。波頭の影響は、電流が印加される方向によるものと考えられる。実際の雷は高さ方向から太陽光発電設備に印加されると想定される。4.3 節では、実験設備の条件から電流の注入方向は横方向とした。これに対し、解析では高さ方向から注入しているので、解析結果の方が、より実際に近い結果を表していると考えられる。波尾の電圧推移は、抵抗結合による電位上昇と静電結合の影響を受ける。解析空間の制限から低抵抗となる構造物を配電盤近傍に配置した。この影響によりアレイの電位分布に実際とは異なる状況が発生し、波尾の結果に影響を与えたものと考えられる。

太陽光発電設備の雷対策を検討するため、解析手法の一つである FDTD 法を用いた検討を行った。FDTD 法を用いた過電圧の解析は、直流配線に発生する過電圧の様相をほぼ再現することができた。雷対策の検討において、接地方式の違いによる過電圧の発生について見極めることは重要であり、SPD の選定基準となる、過電圧の最大値や波尾の電圧推移がほぼ再現できたことは、実用上も問題ないとする。

5.4 直流配電のモデルによる解析結果および検討

5.3節において解析の妥当性が得られた。本節では、実際の直流配電をモデル化しFDTD法を用いた解析により発生する過電圧を解析する。

5.4.1 直流配電のモデルと解析条件

図5-8は、直流配電の解析モデルである。当該モデルは、実際に設置された直流配電設備である。交流配電は受電電圧66 kVで、受電用変圧器10 MVA1台を介して6.6 kVに降圧され、更に高圧用変圧器を介して415 VになりPCSに接続されている。高圧用変圧器は10台設置され、PCS単機容量250 kW20台が、4台ごとに高圧用変圧器に接続され並列運転している。直流側のバス電圧は640 Vである。太陽光発電設備の出力は約12,000 kWでモジュールは薄膜多結晶である。蓄電池設備は4000 kWのリチウム電池で太陽光発電設備とDC連係されている。

雷害対策は、ボンディングやSPDを設置することであるが、大規模な直流配電になると、ボンディングやSPDの設置箇所数によっては、経済性に優れない場合がある。このため、本モデルを用いて直流配電に発生する過電圧について検討し、実際の設備においてボンディングする箇所、SPDの設置箇所の参考にすることとした。雷撃点は蓄電池設備が建物内部に設置され、太陽光発電設備の方が直撃雷を受けるので、太陽電池モジュールのコーナー部とした。図5-9に高圧用変圧器1台とPCS4台分のモジュール配置と雷撃点、図5-10に電流注入方向と注入場所を示す。電流注入点は、アレイPCS022-1のフレームコーナー部およびアレイPCS022-4のフレームコーナー部とした。

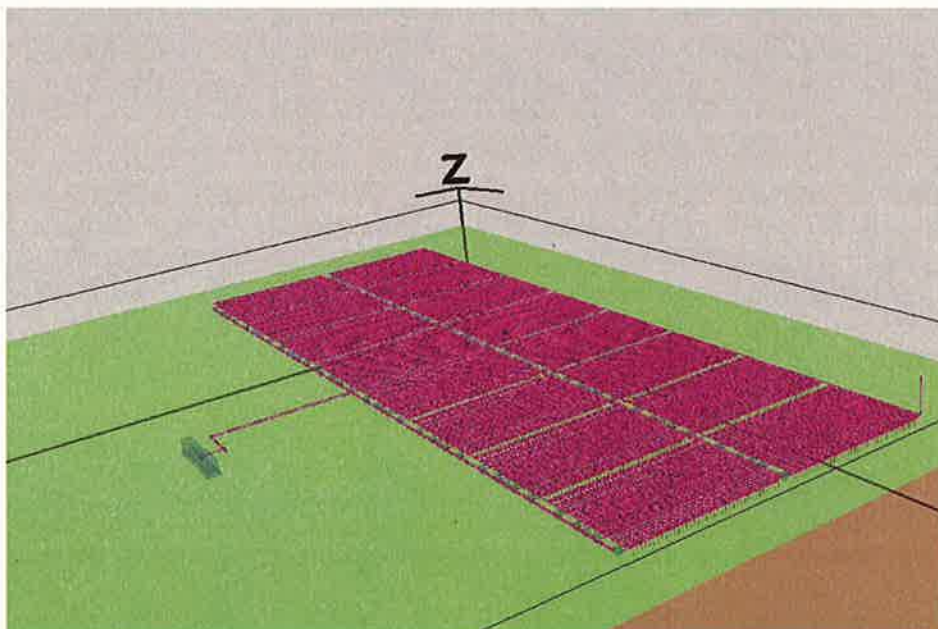


図5-8 解析空間図

落雷の可能性として高いのはPCS022-1のフレームコーナーのような箇所であると考えられるが、参考としてアレイ中央部に落雷があった場合について合わせて検討することとした。表5-2に検討したケースを示す。全部で6つのケースについて検討した。雷撃点Aは、アレイPCS022-1のフレームコーナー部を示している。雷撃点Bは、アレイPCS022-4のフレームコーナー部を示している。接地線はアレイと接続箱間、およびアレイ相互のボンディングの有る場合と無い場

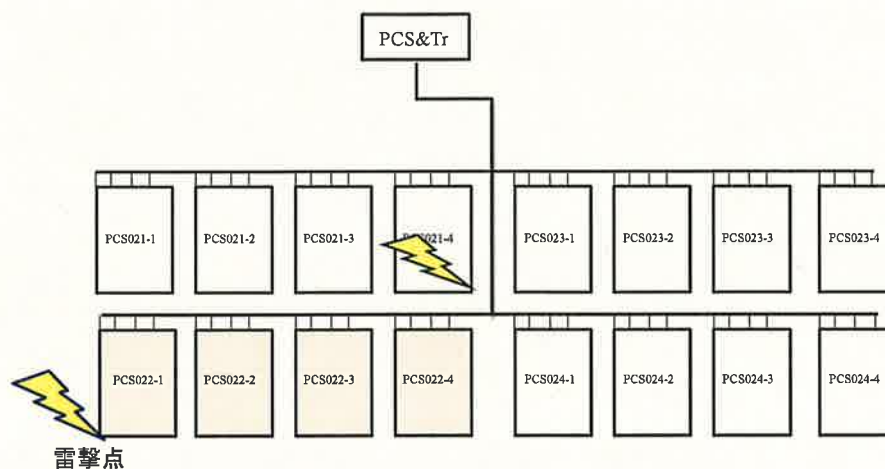


図 5 - 9 モジュールの全体配置と雷撃点

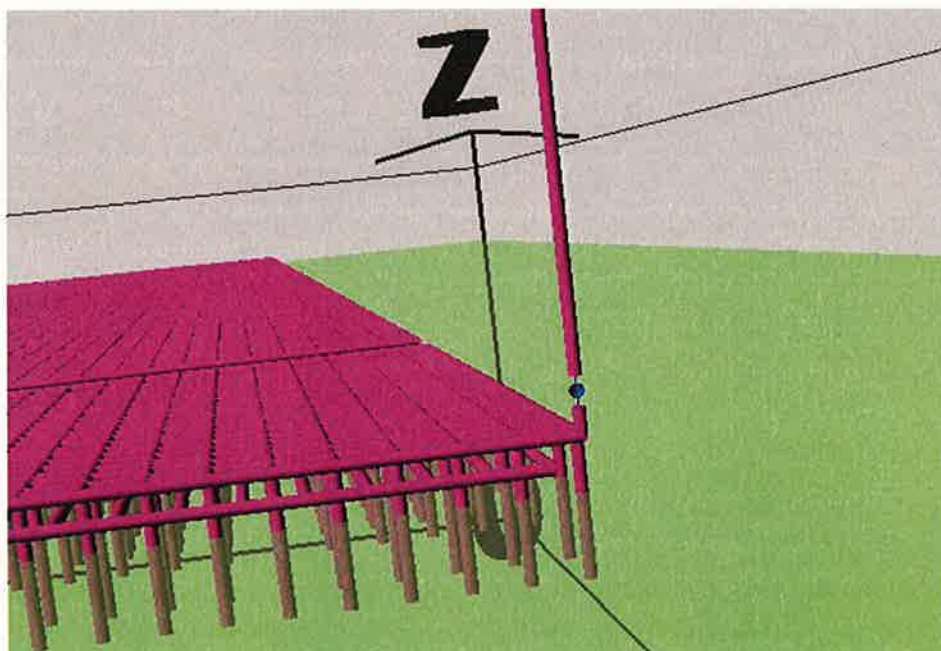


図 5 - 1 0 電流注入方向と注入場所

合，それぞれについて検討を行った。アレイと接続箱間のボンディングは電源配線と同じタイミングで布設されるが，アレイ相互のボンディングは別工程となり，経済的にも負担が大きくなる。このため，直流配線に発生する過電圧がPCS等の機器の絶縁耐圧以下であれば，ボンディングを省略可能と考え，解析的な検討を行った。SPDは設置する箇所が多く，選定するクラスが異なるとコストが最大で10倍程度の差がある。このためSPDの選定に当たり耐量が十分かを判断することを目的にシミュレーションを行った。

表5-3は解析モデルの条件である。dsは解析セルの大きさを示しており0.5 mmの立方体である。Nx, Ny, Nzは解析空間の大きさで500 m×500 mの平面で高さ100 mである。また，大地抵抗率は現地の実測結果と同様の1000 Ωmとし，解析空間の土壌部分は一様とした。図5-11は注入電流波形である。JIS規格で定められている最大電流200 kA，波頭10 μs，波尾350 μsとした。これは雷撃点の対象となる太陽光発電設備が屋外にあること，また，SPD耐量を検討する必要があることが理由である。図5-12にSPDの配置状況を示す。今回の太陽光発電設備は，図5-9に示すようにPCS1台当たり大きく16個のアレイ（主アレイ）に分かれている。また16個のアレイはそれぞれ4つのアレイ（小アレイ）に分かれている。小アレイはそれぞれ接続箱を持ち，それぞれの接続箱の中には計測装置などの重要機器があるため，接続箱のアレイ側およびPCS側にそれぞれSPDが設置されている。ここではアレイ側に設置されるサージ保護素子をSPD1，PCS側に設置されるものをSPD2と呼ぶことにした。図5-13に解析部分の拡大を示す。図中の赤線は直流配線，緑がSPDを示している。解析箇所は，それぞれの条件下において，SPD1およびSPD2に

表 5－2 検討ケース

Case	雷撃点	接地線（接続箱，集電箱とアレイ間）	アレイ同士の接続
1	A	接続あり	なし
2	B	接続あり	なし
3	A	接続有り	有り
4	B	接続有り	有り
5	A	接続なし	なし
6	B	接続なし	なし

表 5－3 検討の条件

ds	Nx	Ny	Nz	α	$\rho[\Omega \text{ m}]$	ϵ_r
0.5	500	500	100	0.3	1000	10

流れる電流，それぞれのSPD両端に発生する電圧とした。電流プローブの向き及び電圧プローブの極性方向は図5-13に示すとおりである。

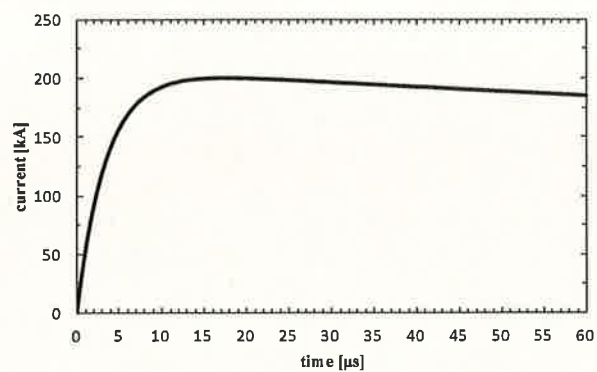


図 5 - 1 1 注入電流波形

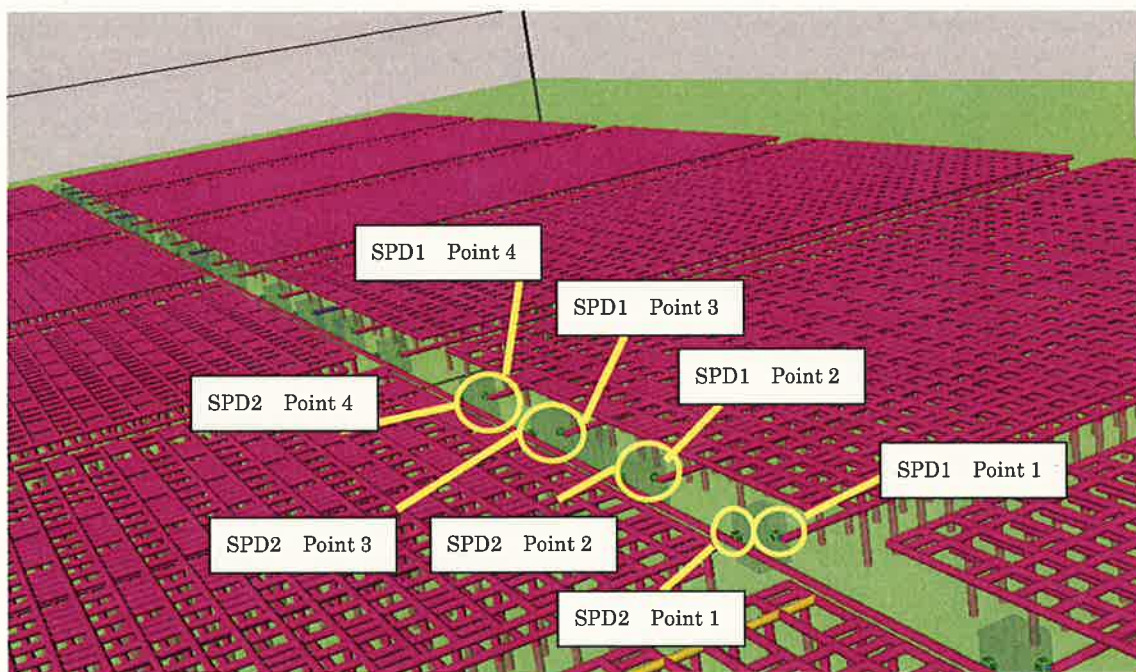


図 5 - 1 2 SPD の設置状況

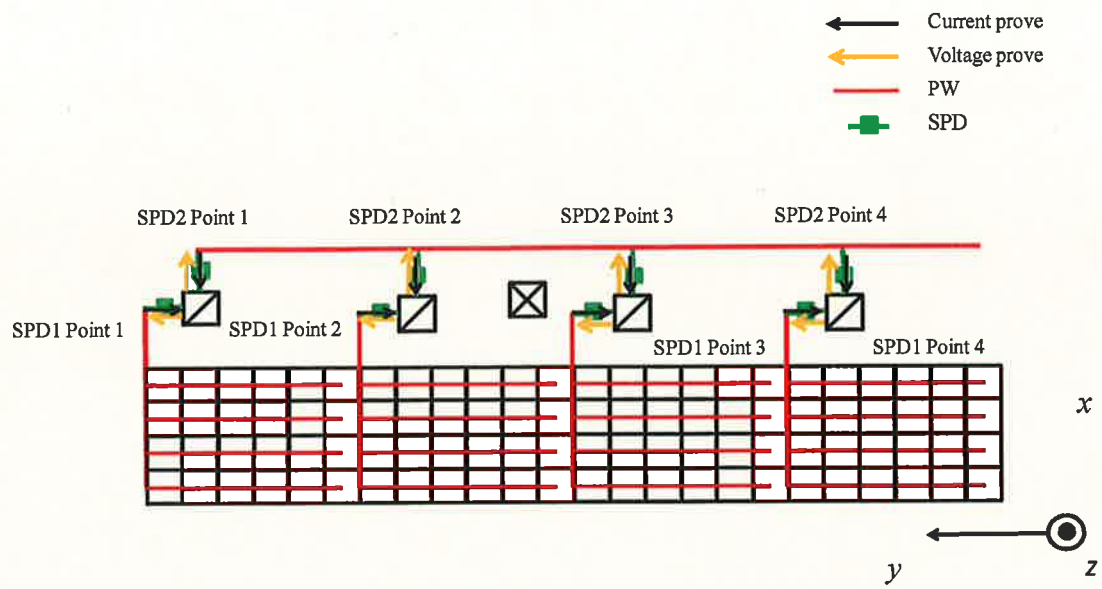
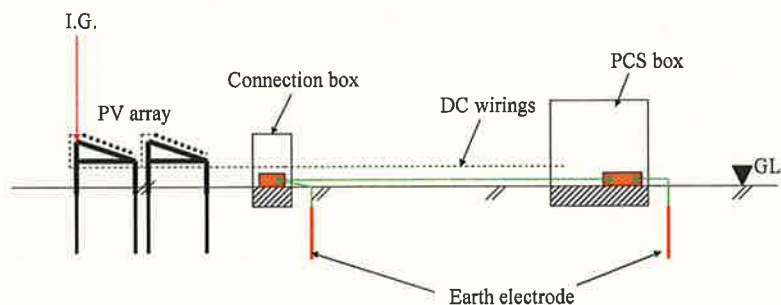


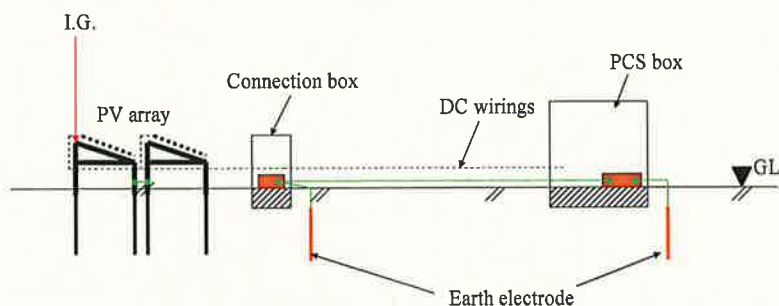
図 5 - 1 3 解析空間の拡大

5.4.2 過電圧のシミュレーション結果

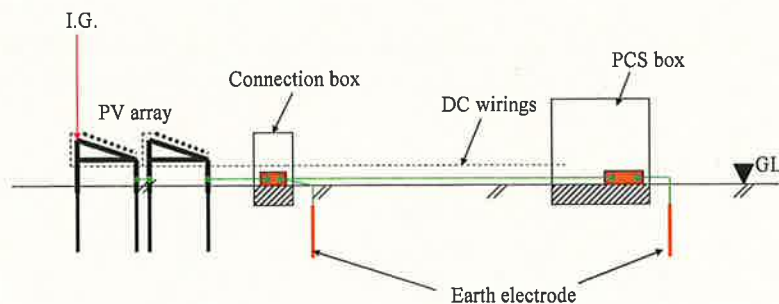
ここでは、シミュレーション結果のうち雷撃点Aの場合で、図5-14に示すようにアレイと接続箱は接地線で接続されていない状態（Case 5）、アレイと接続箱が接地線で接続されている状態（Case 1）、アレイと接続箱が接地線で接続され、さらにアレイ相互をボンディングした状態（Case 3）について示す。これは雷撃点Bの場合が雷撃点Aと比較してSPDに流れる電流が表皮効果により小さくなると考えられるからである。更に、雷撃点に最も近いアレイPCS022-1と雷撃点から最も遠いアレイPCS022-4のSPD1とSPD2に着目し解析結果を述べる。



(a) Case5：単独接地



(b) Case1：一部の統合接地



(c) Case3：統合接地

図5-14 接地線接続の条件

(1) Case5：単独接地

①PCS022-1におけるSPD1とSPD2に加わる電圧と電流

図 5-15 はポイント 1 から 4 に設置されている SPD1 に流れた電流, 図 5-16 は同じくポイント 1 から 4 に設置されている SPD2 に流れた電流を示す。ポイント 1 から 4 に設置されている SPD1 のうちで最大の電流値を記録したのはポイント 1 の 2.3 kA ($t=0.3 \mu\text{s}$) であった。SPD1 のポイント 2, 3, 4 の電流の最大値は 2.1 kA ($t=0.3 \mu\text{s}$) で同じとなった。SPD2 の中で最大はポイント 3 の -3.8 kA ($t=15 \mu\text{s}$) であった。それぞれのポイントにおける SPD1 および SPD2 の波頭を比較すると, 最大値がそれぞれ逆極性を示した。さらに波尾の比較では SPD1 では $15 \mu\text{s}$ を経過すると, 電流値はほぼ零[A]となったのに対し, SPD2 では SPD1 とは異なり, 解析時間内の $60 \mu\text{s}$ でも零[A]とはならず, 最大値からの減衰もあまり見られず, ほぼ一定値を推移した。

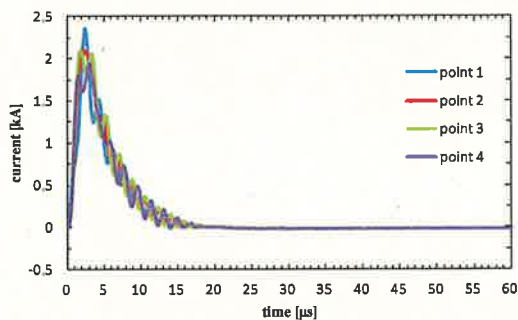


図 5-15 SPD1 に流れる電流

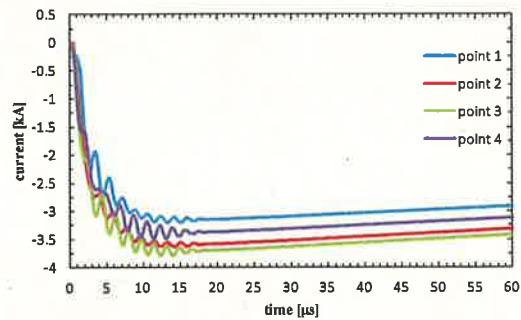


図 5-16 SPD2 に流れる電流

②PCS022-4におけるSPD1とSPD2に加わる電圧と電流

図 5-17 はポイント 1 から 4 に設置されている SPD1 に流れた電流, 図 5-18 は同じくポイント 1 から 4 に設置されている SPD2 に流れた電流を示す。SPD1 のうち, 最大の電流値を記録したのはポイント 1 の 0.38 kA ($t=0.3 \mu\text{s}$) となった。SPD1 のポイント 2 は 0.37 kA, 同ポイント 3, 4 は 0.3 kA ($t=0.3 \mu\text{s}$) となった。SPD2 の最大値はポイント 1, 2 の 0.8 kA ($t=4 \mu\text{s}$) となった。SPD1 と SPD2 で波尾に違いが見られた。PCS022-1 の SPD2 の波尾の状況とは異なり, PCS022-4 の SPD2 は 0.2 kA 程度まで減衰した。また, ①項と同様に SPD1 と SPD2 に流れる電流は, 逆の極性を示した。

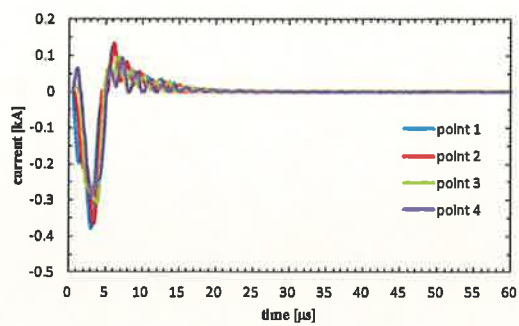


図 5 - 1 7 SPD1 に流れる電流

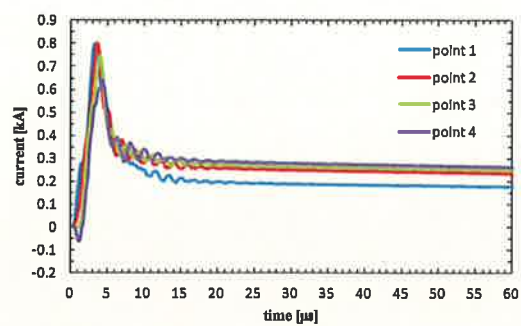


図 5 - 1 8 7 SPD2 に流れる電流

(2) Case1：一部の統合接地

①PCS022-1におけるSPD1とSPD2に加わる電圧と電流

図 5-19 はポイント 1 から 4 の SPD1 に流れた電流, 図 5-20 はポイント 1 から 4 の SPD2 に流れた電流を示す。SPD1 の最大値はポイント 1 の 0.6 kA ($t = 0.1 \mu\text{s}$) となった。SPD1 のポイント 2, 3, 4 は 0.07kA ($t = 0.2 \mu\text{s}$) となった。SPD2 の最大値はポイント 4 の 55 kA ($t = 24 \mu\text{s}$) となり, 他のポイント 1 からポイント 3 の SPD に流れた電流と比較すると大きく, ポイント 4 に偏る傾向が見られた。SPD1 と SPD2 に流れた電流の波尾に違いが見られた。ポイント 1 から 4 の SPD1 では共通してほぼ零となるが, ポイント 1 から 4 の SPD2 では共通して解析時間内では零とはならなかった。また, SPD2 の電流は, すべて同じ負極性を示した。

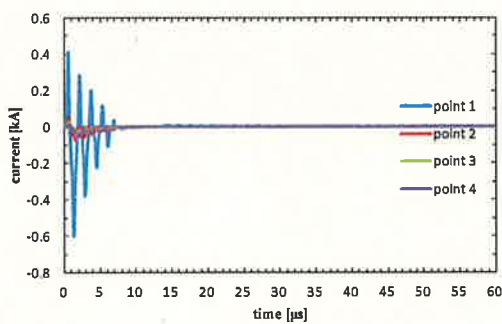


図 5-19 SPD1 に流れる電流

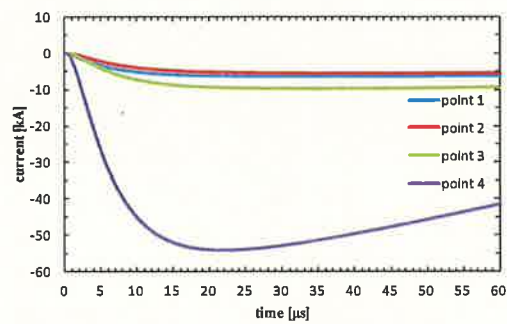


図 5-20 SPD2 に流れる電流

②PCS022-4におけるSPD1とSPD2に加わる電圧と電流

図 5-21 はポイント 1 から 4 の SPD1 に流れた電流, 図 5-22 はポイント 1 から 4 の SPD2 に流れた電流を示す。SPD1 の最大値はポイント 1 の 0.42 kA ($t = 0.1 \mu\text{s}$) となった。SPD1 のポイント 2, 3, 4 は 0.007 kA ($t = 0.3 \mu\text{s}$) となった。SPD1 では振動性の電流が確認できた。SPD2 の最大値はポイント 1 の 30 kA ($t = 24 \mu\text{s}$) となった。SPD2 のポイント 1 とポイント 4 の電流は逆極性となった。SPD1 と SPD2 で波尾に違いが見られた。ポイント 1 から 4 の SPD1 では兎湯通してほぼ零に減衰するのに対し, SPD2 ではポイント 2 およびポイント 3 は解析時間内に零とはなるものの, SPD2 のポイント 1 およびポイント 4 は零とはならなかった。SPD2 のポイント 2 とポイント 3 の電流は, 逆の極性を示した。

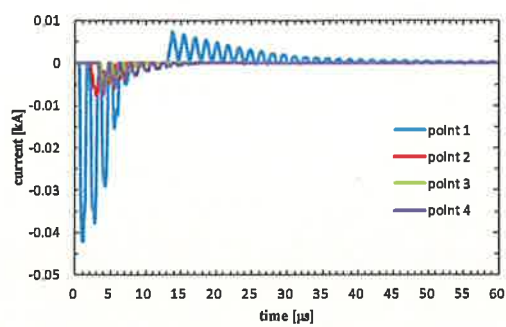


図 5 - 2 1 SPD1 に流れる電流

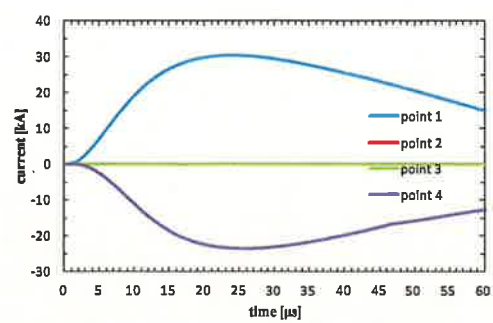


図 5 - 2 2 SPD2 に流れる電流

(3) Case3 : 統合接地

①PCS022-1におけるSPD1とSPD2に加わる電圧と電流

図 5-23 はポイント 1 から 4 の SPD1 に流れた電流, 図 5-24 はポイント 1 から 4 の SPD2 に流れた電流を示す。SPD1 の最大値はポイント 1 の 0.52 kA ($t=0.1 \mu\text{s}$) となった。SPD1 のポイント 2, 3, 4 は 0.007 kA ($t=0.3 \mu\text{s}$) となった。SPD2 の最大値はポイント 3 の 3.5 kA ($t=11 \mu\text{s}$) となり, (2) 項 Case5 の十数 kA ほどの差ではないが, 1 kA から 2 kA 程度の差で偏る傾向が見られた。ポイント 1 から 4 の SPD1 の波尾は共通してほぼ零に減衰するが, SPD2 の波尾はポイント 1 およびポイント 4 では零に減衰するものの, ポイント 2 およびポイント 3 は零とはならなかった。しかしながら (1) 項 Case1 や (2) 項 Case5 の SPD2 とは異なり, 零に減衰する時間に早い傾向が見られた。

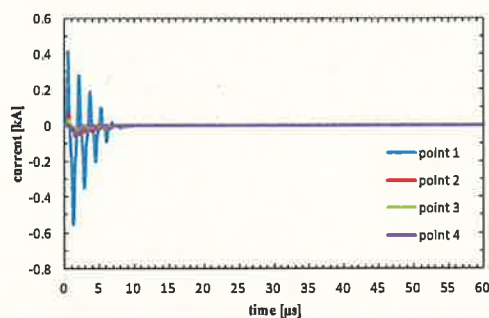


図 5-23 SPD1 に流れる電流

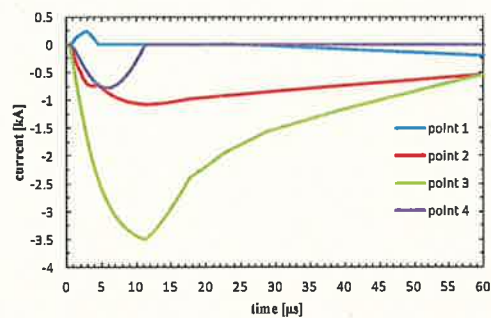


図 5-24 SPD2 に流れる電流

②PCS022-4におけるSPD1とSPD2に加わる電圧と電流

図 5-25 はポイント 1 から 4 の SPD1 に流れた電流, 図 5-26 はポイント 1 から 4 の SPD2 に流れた電流を示す。SPD1 の最大値はポイント 1 の 0.017 kA ($t=0.1 \mu\text{s}$), SPD1 のポイント 2, 3, 4 は 0.01 kA ($t=0.4 \mu\text{s}$) となり, それぞれ振動性の減衰波形となった。SPD2 の最大値はポイント 1 の 0.48 kA ($t=11 \mu\text{s}$) で, SPD2 のポイント 2, 3, 4 は零となり, ポイント 3 に偏る傾向があった。SPD1 と SPD2 で波尾に違いが見られ, SPD1 ではほぼ零となった。SPD2 ではポイント 2, 3, 4 では零となるものの, ポイント 1 では $30 \mu\text{s}$ 経過後に零となった。

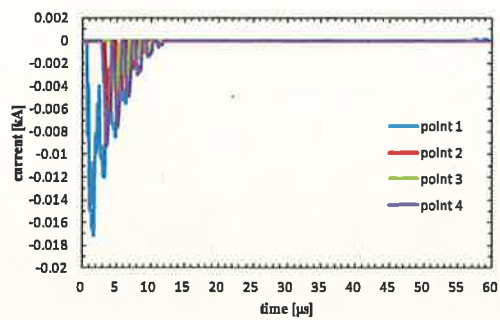


図 5-25 SPD1 に流れる電流

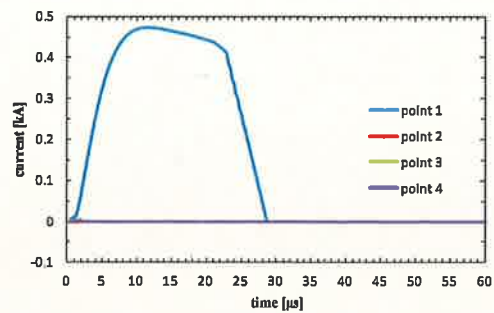


図 5-26 SPD2 に流れる電流

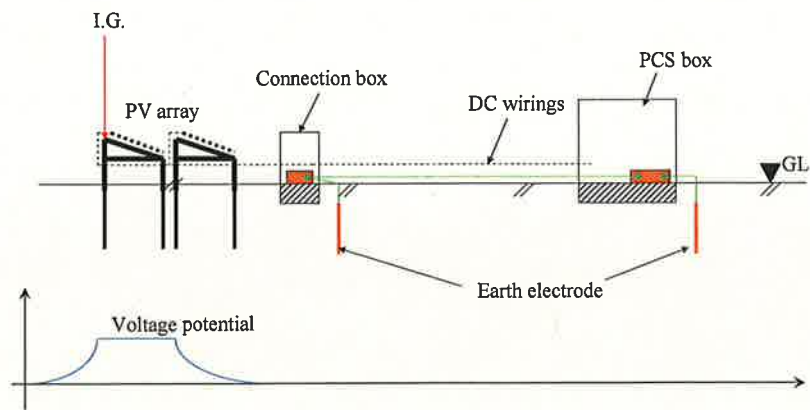
5.4.3 結果検討

図5-27にそれぞれのケースにおける電位上昇の状況を示す。Case5のアレイや接続箱間の接地線が無い場合、雷撃を受けるアレイPCS022のSPDに電流が偏る傾向がある。ここでは示していないが、他のアレイPCS021やPCS023などのSPDには電流が流れなかった。図5-27 (a) に電位上昇の状況を示す。雷撃があると、PCSや接続箱、アレイのフレームなどの構造部は電位が上昇する。この電位上昇は、アレイと接続箱間、アレイ相互が接続されていないので、雷撃のあるアレイの電位が最も大きくなる。電位が上昇し、SPDの動作電圧に至るとSPDに電流が流れ始めるが、アレイ相互などの電位上昇に偏りがあるため、SPDに流れる電流も偏ることになる。最も経済的なクラスⅡ相当のSPDの場合、想定される最大電流200kAでは耐量が不足し、雷撃が有った場合にSPDの焼損に至る恐れがある。またアレイ相互で同電位とならないため、SPDのポイント1にも電流が流れている。SPDが多くの箇所で動作し、耐量不足の結果、保護用遮断器の動作や焼損に至ると、その後の点検作業や交換作業にも時間を要する結果となる。

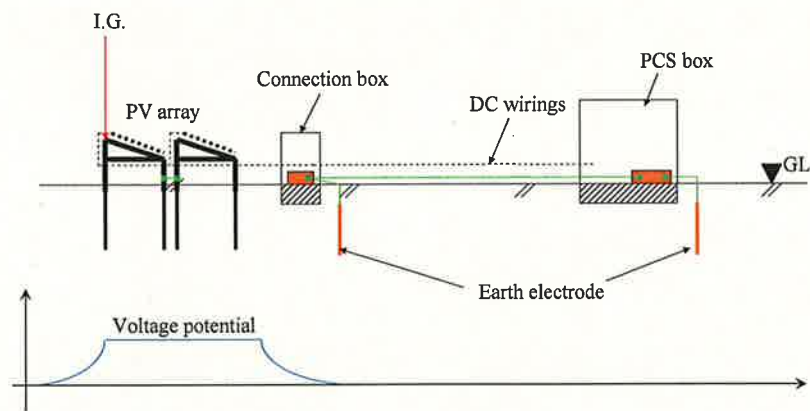
図5-27 (b) にCase1の電位上昇の状況を示す。Case1のアレイと接続箱間を接地線で接続すると、電流に偏りが見られるものの、負担する電流は小さくなる。これは、アレイと接続箱が接地線で接続されることで電位の上昇が他のアレイも含めて、ほぼ同程度となり、動作したSPDで電流が分担されるからである。またSPDのポイント1は、ほとんど電流が流れない結果となったが、SPD2で電流が分担された結果、電流が流れても電路と対地間の電位がSPDの制限電圧以上に上昇しないためである。

図5-27 (c) にCase3の電位上昇の状況を示す。Case3のCase5の接地線の処置と更にアレイ相互を接続すると、PCSや接続箱、アレイのフレームなどの構造部の電位は同じになる。電位が同じになると、SPDへ流れる電流の分担がより平均化されることになる。他のアレイに設置されるSPDも含めて、SPDへ流れる電流がそれぞれのSPDで分担されることは、SPDの耐量の面からもクラスⅠからクラスⅡへの変更や、SPD自身の損傷の恐れが無くなる。

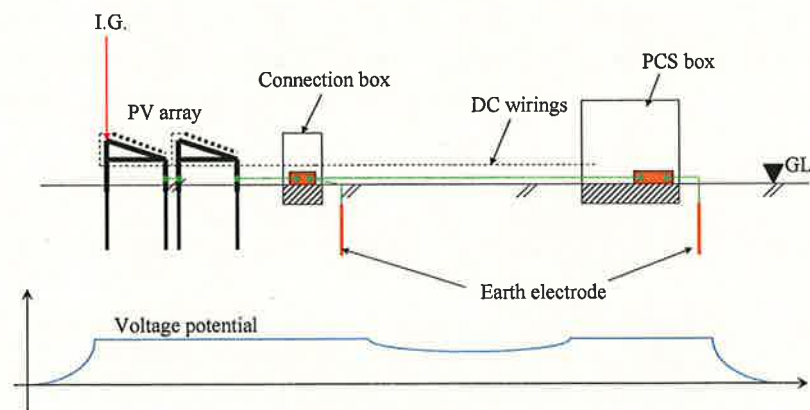
本論文で示した大規模な直流配電のように大型の太陽光発電設備が連係されている場合、直撃雷を受ける可能性が高い。アレイと接続箱は、4.3節の実験結果および5.3節の解析結果から接地線による接続することにより直流配線に発生する過電圧の波尾が減少しSPDが動作した際の電流が減少する。アレイ相互のボンディングを行うことで、さらにSPDに流れる電流が分散される。



(a) Case5 : 単独接地



(b) Case1 : 一部の統合接地



(c) Case3 : 統合接地

図5-27 接地線接続の条件による電位分布

5.5 まとめ

本章では太陽光発電設備及び直流配電への落雷時に直流配線に発生する過電圧を検討するため、数値電磁界解析の一つである FDTD 法を用いて検討を行った。検討では接地方式の違いに着目し、統合接地と、単独接地について過電圧の発生の相違を確認した。更に、実際の直流配電設備へ適用し、ボンディングの効果について検討した。

- (1) 太陽光発電設備に関連する機器や支持材などは相互に接続し、等電位化することで直流配線間、直流配線－対地間に発生する雷過電圧の波頭値だけでなく、波尾を抑制する効果がある。これは実験結果と同様であり、FDTD 法による解析の有効性が確認できた。
- (2) 架台とモジュール内部配線は電磁・静電結合している。このため、架台が電位上昇すれば、架台とモジュール内部配線間の相互インダクタンス、静電容量に依存してモジュール内部配線と対地間に過電圧が発生する。このため、FDTD 法による解析では、関連する機器の配置、誘電率、導電率をできるだけ実際の状況に近づける必要がある。電気設備に用いられる機器や材料は誘電率が一様でありモデル化しやすいと考えられる。これに対し、大地抵抗率は土壌改良などにより大地が一様な条件であれば問題ないが、改修現場において埋設物などがあると大地内部の状況を詳細にモデル化することはほぼ不可能であり、このような場合に解析による検討は困難となる。
- (3) 太陽光発電設備への雷撃時に内部配線に発生する過電圧は、FDTD 法による解析が可能である。太陽光発電設備は本研究で実験した地面に直接、設置されるケースだけでなく、ビルなどの屋上に設置されるなど多くのケースが考えられる。これに対し、それぞれ実規模モデルを構成し実験的に検討を行うことは現実的ではなく、FDTD 法を用いた過電圧の解析は有効な手法であると考ええる。SPD を設計するための過電圧の最大値の算出やボンディングの要否判定を FDTD 法を用いて行うことで、太陽光発電設備の経済的かつ効果的な雷対策を行うことができる。

第6章 結論

本論文は、直流配電に電気機器を設置する場合に重要な電磁環境両立性を考慮した設置環境の適用技術を確立する過程で得られた成果をまとめたものである。

これまで明らかにされてこなかった電磁環境について、特に地絡保護協調、接地方式の違いによる高周波電流、サージ電圧について着目し研究を行った。

その研究の成果は、国内外を問わず直流配電の安全性を確保する技術として広く展開されていくと考えている。

以下に本研究で得られた成果を各章について要約し、本論文の結論としたい。

第1章では、本研究の目的と意義を述べた。この中で、背景として、電機機器の電磁環境の現状について取り上げ、本研究のポイントとなる「接地」に関する研究の必要性について論じた。

第2章では、直流配電に関連する障害事例についていくつか代表的なものを示した。低周波領域の障害事例として、地絡事故時の健全系統への波及事故、変圧器の偏磁について、高周波領域の障害事例として、電圧形インバータから発生する高周波電流による機器の不具合事例、落雷時の雷過電圧による直流制御配線への誘導障害について説明した。直流配電は、利用範囲が多く、多くの障害に対し、未然に防止するための対策が重要であることに言及した。安全で品質の高い直流配電を提供するための電磁環境に関する課題について「接地」の重要性を示し、接地方式と地絡保護協調の研究が必要であることを述べた。地絡保護については、協調が適切であること、接地方式については、提案されているいくつかの接地方式について、高周波電流や雷サージの特徴を明らかにする必要があることを示した。

第3章では、直流配電の低周波領域における EMC に関する実験的検討として、大きく二つのことを行った。一つは、直流配電の地絡保護協調において他系統の漏電遮断器の不要動作を防止するための整定方法について検討した。もう一つは、直流配電の地絡事故時の変圧器偏磁現象に関する対策製品を開発した。これらについて明らかにされたことを以下にまとめる。

- (1) 直流配電における地絡保護協調について、波及事故を防止するための整定値の条件式を示し、実際の事故発生現場に適用し良好な結果が得られた。
- (2) 整定値の条件式において、対地インピーダンス、特に対地静電容量を明らかにする必要がある、モジュールの対地静電容量の実測を行った。その結果、バックシートにアルミを用いたモジュールにおいて、モジュールの形状によって決定される条件により、平行板コンデンサの静電容量を算出する一般的な式を用いて対地静電容量を求めることが可能である。

- (3) 地絡保護協調が適正に動作するまでの間、電路に設置された機器に直流電圧が印加され、変圧器では偏磁が発生する。この対策として抵抗付き接地コンデンサが有効である。

第4章では、直流配電の高周波領域におけるEMCに関する実験的検討として、大きく二つのことを行った。一つは、電圧形インバータから発生する高周波電流の接地方式の違いについて検討した。もう一つは、直流配電を構成する機器のひとつである太陽光発電設備に雷害があった場合の過電圧について検討した。これらについて明らかにされたことを以下にまとめる。

(1) 直流配電を有する交流配電側の接地方式

- ① TT 接地方式を採用する場合は、中性相と対地間に電圧が発生し、これによりインバータが設置されていない系統において対地静電容量などを介して電流が流れるため、インバータが設置されていない系統の機器の電流耐量の検討を行う必要がある
- ② TN 接地方式を採用する場合は、TT 接地方式と比較しインバータが設置されていない系統への影響は軽減するものの、構造体を介して B 種接地線に流れ込む高周波電流が増加するので、誘導障害を考慮した設計施工が重要である。更に、B 種接地抵抗に相当するものが無いこともあり、フィルタやケーブルの対地静電容量によるキャパシタンスにより振動電流が発生する恐れがある。
- ③ IT 接地方式があるが、TT 接地方式における B 種接地に相当する部分が、開放もしくは高抵抗となるものである。日本国内ではキャパシタンスを用いた接地方式が用いられることがあり、最大で $16\mu\text{F}$ のキャパシタンスが設置される。この場合でも、変圧器やケーブルのインダクタンスによる共振や振動電流が発生することはない。このようなことから直流配電を含めた電気設備の接地方式として IT 接地方式が最適であるといえる。

(2) 雷対策を考慮した接地方式

- ① 架台を含めたアレイの接地と配電盤の接地を接続することでそれらの間を行き来する電力線の対地電圧を軽減することができる。連接接地されることで電力線対地電圧の波尾部は大きく低減され、そこに設置するサージ保護素子の耐量を軽減できる。
- ② 連接接地したとしても架台等を流れる電流からの誘導により発生する直流配線の線間電圧は、大きく低減されることはない。直流配線の線間に発生する過電圧は架台を流れる電流からの電磁誘導により発生し、配線を金属配管等に収めることでその大きさを低減できる。
- ③ 連接接地したとしても直流配線の対地電圧、線間電圧はサージ保護素子を省略できるほど小さくはなく、適切な耐量のサージ保護素子を設置する必要がある。JIS C 0367-1 では後続雷撃の電流の雷保護レベル I の平均しゅん度は $200\text{ kA}/\mu\text{s}$ となり、直撃を受け

るアレイの正負極側配線間に発生する過電圧は 270 kV となることが想定される。

第 5 章では、直流配電の雷対策に着目し、FDTD 法を用いて実験的に雷電流を注入した太陽光発電設備の直流配線に発生する過電圧について検討を行った。更に、実際の直流配電設備について検討を行い、以下を明らかにした。

- (1) 太陽光発電設備に関連する機器や支持材などは相互に接続し、等電位化することで直流配線間、直流配線—対地間に発生する雷過電圧の波頭値だけでなく、波尾を抑制する効果がある。これは実験結果と同様であり、FDTD 法による解析の有効性が確認できた。
- (2) 太陽光発電設備への雷撃時に内部配線に発生する過電圧は、FDTD 法による解析が可能である。太陽光発電設備は今回実験した地面に直接、設置されるケースだけでなく、ビルなどの屋上に設置されるなど多くのケースが考えられる。これに対し、それぞれ実規模モデルを構成し実験的に検討を行うことは現実的ではなく、FDTD 法を用いた過電圧の解析は有効な手法であると考え。SPD を設計するための過電圧の最大値の算出やボンディングの要否判定を FDTD 法による解析結果を用いることで、太陽光発電設備の経済的かつ効果的な雷対策を行うことができる。

今後の展開として以下にまとめる。

- (1) 直流配電は今後も多く採用が検討されている。しかしながら、交流配電の運用実績に比べると少ない。このため、継続的な測定データの収集・蓄積が今後も必要であると考え。現在、メガソーラ発電所において雷撃時に発生する電位や電流測定、直流配電での電源品質測定を継続している。
- (2) 直流配電では、半導体電力変換装置が多く用いられる。これらの高周波特性について報告された事例は無い。これらについて明らかにすることは、直流配電における回路シミュレーションの簡素化が図られ、実務レベルへ適用が可能となる。

参考文献

第1章

- [1] 太陽光発電協会ホームページ, <http://www.jpea.gr.jp/document/figure/index.html> (2013)
- [2] 電気学会技術報告:「次世代電力システムにおける直流給配電の研究動向」, 電気学会電力・エネルギー部門, 第1215号 (2011)
- [3] 浅川:「直流給電, その可能性, 4-2 直流用ブレーカ, 4-3 400Vdc10A用プラグとコンセント」, 電設技術, pp.51-58 (2011)
- [4] 田中, 山崎:「直流給電システムの発振条件・発振領域に関する解析」, 信学技報, pp.23-28 (2004)
- [5] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構:「新電力ネットワークシステム実証研究 品質別電力供給システム実証研究」, pp.49-54(2008)
- [6] 高橋:「図解 接地システム入門」, オーム社, pp.3-24 (2009)
- [7] 日本工業標準調査会:「JIS A 4201 建築物等の避雷設備」, 「JIS C 0367 雷による電磁インパルスに対する保護」
- [8] 大川:「わかる 短絡保護協調」, オーム社 (2006)

第2章

- [9] 柿ヶ野, 三浦, 伊藤, 打田:「超高品質電力供給を可能とするDCマイクログリッドのシステム構成と分散電源及び電力貯蔵装置の電力制御法」, 電力技術・電力系統技術・半導体電力変換合同研究会, PE-06-10 (2006)
- [10] 廣瀬:「直流給電を取り巻く最近の技術動向」電設技術, pp.16-27 (2011)
- [11] 日本工業標準調査会:「JIS C 0364-3 建築電気設備:一般特性の評価」
- [12] 酒井, 千葉, 三木:「太陽電池アレイの対地静電容量が地絡保護協調に与える影響」, 日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会, E-61 (2010)
- [13] 中野, 酒井:「某新聞社印刷工場の輪転機ノイズ対策」, 電気設備学会全国大会, A-19 (2010)
- [14] 坂本, 酒井:「蓄電設備の高周波特性」, 電気設備学会全国大会, H-15 (2011)
- [15] 酒井, 古屋, 川口, 大久保, 村岸:「雷サージ反射現象による変圧器1次側中性点の電位上昇の事例」, 電気設備学会全国大会, A-4 (2003)
- [16] 電力中央研究所:「発変電所耐雷設計ガイドブック」, (財)電力中央研究所報告 (1976)
- [17] 電気設備学会「電気設備の電路に関する基礎技術」, (社) 電気設備学会 (1997)
- [18] 堀内, 千葉, 吉田, 酒井:「雷サージによる常用発電機解列用遮断器の不要動作とその対策について」, 電気設備学会全国大会, B-16, 2010.8.27

第3章

- [19] 加藤, 太陽光発電システムの不具合事例の分析・評価(1), 太陽エネルギー, Vol133 - No4(2007), p69-p74

- [20] 酒井・千葉他，太陽電池アレイの対地静電容量が地絡保護協調に及ぼす影響，太陽・風力エネルギー講演論文(2010)，p273-p274
- [21] 高島、山口他，対地静電容量計測を用いた太陽電池モジュール間の断線箇所検出手法の実験的検討，太陽エネルギー，Vol33 - No5(2007)，p69-p74
- [22] 高島・山口他，信号応答による太陽電池ストリング故障検出手法の実験的検討，太陽・風力エネルギー講演論文(2007)，p145-p148
- [23] 山口・高島他，太陽電池アレイにおける地絡箇所の検出に関する実験的検討，太陽/風力エネルギー講演論文(2007)，p141-p144
- [24] 矢元・三輪他，稚内メガソーラプロジェクト(4)直流回路人工故障試験結果，平成 21 年度電気学会全国大会，p71-p72
- [25] 松野，稚内メガソーラプロジェクト(2)太陽電池静電容量による漏れ電流検証結果，平成 21 年度電気学会全国大会，p67-p68
- [26] 桜井・黒川，太陽光発電アレイ分布定数回路シミュレーション，太陽/風力エネルギー講演論文(2000)，p307
- [27] アジレントテクノロジー，インピーダンス測定ハンドブック 2003 年版，p2.5-p2.7
- [28] 電気協同研究，配電系統における力率問題とその対応，第 66 巻-第 1 号，p83-p87
- [29] 太陽光発電協会，太陽光発電システムの設計と施工，p34-p47
- [30] (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構，産業用太陽光発電フィールドテスト事業，平成 11-平成 14 年
- [31] 町田，直流送電工学，p244-p248，東京電機大学
- [32] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：「次世代高効率エネルギー利用型住宅システム技術開発・実証事業における，将来の省エネルギー効果の可能性に関する調査報告書」(2010.2)
- [33] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：「データセンタ及びサーバの電源システム最適直流化，直流を利用する上での信頼性・安全性確保に必要な要素技術」(2009.3)
- [34] 電力技術委員会：「次世代電力システムにおける直流給配電の研究動向」，電気学会，pp. 40-45
- [35] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：「新電力ネットワークシステム実証研究 品質別電力供給システム実証研究」，pp.49-54(2008.3)
- [36] 宮脇他：「変圧器の直流偏磁について」，平成元年電気学会全国大会，No.806
- [37] 鈴木他：「変圧器の直流偏磁状態が無負荷特性に与える影響」，平成 12 年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.561
- [38] 渡辺，安達他：「25Hz 交流電源の偏磁現象と対策」，平成 16 年電気学会全国大会，4-002
- [39] 杉ノ原，藤本他：「大崎発電所 220kV 主変圧器の直流偏磁現象と対策」，平成 13 年電気学会全国大会，

- [40] 日野，金子他：「インバータ用変圧器の漏れ磁束検出による偏磁抑制制御方法」，平成 23 年電気学会全国大会，4-159
- [41] 蔵元，古屋他：「接地コンデンサと抵抗を組み合わせた接地装置の開発」，平成 14 年度電気設備学会全国大会，pp. 199-200

第4章

- [42] 川瀬，高橋：「接地技術入門」，オーム社，pp.1-6
- [43] 高橋：「図解 接地システム入門」，オーム社，pp.25-54，pp.147-162
- [44] IEEE：「IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment IEEE Std 1100-1999」，pp.129-165
- [45] 中野，酒井：「某新聞社印刷工場の輪転機ノイズ対策」，第 28 回電気設備学会全国大会，pp.41-42
- [46] 酒井，小川，水野：「誘導電動機のインバータノイズ障害事例とその対策」，第 26 回電気設備学会全国大会，pp.51-52
- [47] 三浦，酒井：「脳神経外科での DBS 手術における脳波形ノイズの調査について」，第 28 回電気設備学会全国大会，pp.171-172
- [48] Victor J.Maggioli：「Impact of Fiber optics on Grounding of Distributed Electronics」，IEEE Transactions on Industry Applications，Vol. 25，No. 3，May/June 1989
- [49] 森本：「統合接地システムにおける PWM インバータの漏洩電流への対策」，電気設備学会誌 Vol.31，No. 6，pp.436-442
- [50] 安本：「建物導体構造物に流れる循環電流」，第 25 回電気設備学会全国大会，pp.203-204
- [51] T.Tuchida：「A Study on Suppressing Common-mode Currents from Inverters」，APEI The 10th International Workshop，APEI-12
- [52] 竹谷：「接地設備のあり方」，電気設備学会誌 Vol. 23，No. 10，pp.754-757
- [53] 誘導電動機の高性能化技術調査専門委員会：「誘導電動機の高性能化技術」，電気学会技術報告 第 997 号(2004.12)
- [54] 田辺，浅川，野田，河本：「数値電磁界解析に基づく垂直接地電極の高周波等価回路構成手法に関する妥当性」，電力中央研究所研究報告 T03022(2004.3)
- [55] 本山：「接地網の雷サージ特性に関する実験的検討」，電力中央研究所 T01063(2002.4)
- [56] 田中，赤城，古安他：「低周波領域における直流電鉄用変電所の接地抵抗特性測定」，平成 24 年度電気学会全国大会，pp.117-118(2012.3)
- [57] 関岡：「接地抵抗の定常値および過渡特性について」，平成 23 年度電気学会電力・エネルギー部門大会，pp.25-19 - 25-20(2011)
- [58] NEDO：「大規模太陽光発電システム導入の手引き（稚内サイト，北杜サイト）」(2010-4)
- [59] 竹谷是幸：「太陽光発電システムの雷保護」，BE 建築設備，pp. 52 - 57 (2009-9)
- [60] 高橋昌英・川崎憲介・松延多喜之介：「太陽光発電システムの雷サージ特性と耐雷対策」，

電学論 B , Vol.109 , No.10 , pp. 443 - 450 (1989-10)

[61] 山本和男・定時大志・柳川俊一：「メガソーラー発電所雷撃時に発生する過電圧」, 平成 22 年電気学会全国大会 , 7-53 , pp.83-84 (2010-3)

[62] Jesus C. Hernandez, Pedro G. Vidal and Francisco Jurado, “Lightning and Surge Protection in Photovoltaic Installations”, IEEE Trans., Power Delivery, Vol. 23, No. 4, pp. 1961 - 1971 (2008-12)

[63] 久保佑太・宇野博輝・長岡直人・馬場吉弘・雨谷昭弘：「太陽光発電パネル構造体の共振特性と雷サージ過電圧への影響」, 電気学会電力エネルギー部門大会 , No. 254 , pp.27-5 - 27-6 (2011-8)

[64] Z.Benesova, R.Haller, J.Birkel, P.Zahlmann, “Overvoltages in Photovoltaic Systems Induced by Lightning Strikes”, 2012 International Conference on Lightning Protection(2012-9)

[65] 廣井英幸・酒井重嘉・関健一・榊原宏行・山本和男：「雷サージにより発生する太陽電池パネルの誘導電圧」, 2011 年電気設備学会全国大会 , No.A-15 , pp.33-34 (2011-9)

[66] 酒井重嘉・関健一・榊原宏行・山本和男：「太陽電池アレイ雷撃時に発生する過電圧」, 電気学会電力エネルギー部門大会 , No. 255 , pp.27-7 - 27-8 (2011-8)

[67] NEDO：「太陽光発電フィールドテスト事業に関するガイドライン 設計施工・システム編」(2010-5)

[68] サージ現象に関する数値電磁界解析手法調査専門委員会：「数値電磁界解析 サージ現象への適用」, 電気学会(2008-3)

第5章

[69] 宇野：「FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析」, コロナ社 , pp.1-149 (2009)

[70] 馬場：「数値電磁界解法の EMT 解析への適用に関する最新動向」, 電気学会関西支部専門講習会 (2011)

[71] Kazuo Yamamoto, Shunichi Yanagawa, et al, “Analytical Surveys of Transient and Frequency Dependent Grounding Characteristics of a Wind Turbine Generator System on the Basis of Field Tests”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY(2010)

謝辞

本研究を論文としてまとめるにあたり，4年もの長期にわたり丁寧な御指導と御鞭撻，そして温かい励ましを賜りました明治大学 教授 三木一郎先生に心から厚く御礼申し上げます。

また，論文審査と研究の節目で貴重なご助言をいただきました，明治大学 教授 松瀬貢規先生，教授 久保田 寿夫先生に深く御礼申し上げます。

本研究を実施するにあたり，株式会社関電工 会長 山口 学（当時 社長），副社長 長谷川 努，営業統轄本部長 高橋健一（当時 品質工事管理部長），営業統轄本部副本部長 小松原文明，技術フェロー 古屋一彦，品質工事管理部部長 水野克美（当時 同部 副部長），技術開発本部 副部長 日向野明（当時，同本部つくば技術研究所所長）には，明治大学大学院博士課程に進学する機会を作っていただきました。感謝申し上げます。

中部大学 准教授 山本和男先生（当時 神戸高等専門学校 准教授）には太陽光発電設備の雷対策検討だけではなく，論文執筆にあたり多くのご助言をいただきました。また，二度にわたる海外発表という貴重な機会をいただき，英論文執筆，発表に際し御指導をいただきました。

株式会社テクノクオリティ - 代表取締役 渡部利範氏（当時 キヤノン株式会社 品質本部 部長）には，博士号を取得された社会人の先輩として，多くの刺激を受け，筆者が博士課程へ進学するきっかけを作っていただきました。

実験においては，株式会社関電工 つくば研究所 主幹研究員 榊原宏行氏，主任研究員 廣井英幸氏を始め，同研究所研究員，エンジニアリング部員の方々に大変なご尽力いただきました。感謝申し上げます。

最後になりますが，明治大学に入学し，恩師 西山栄枝先生（故人，当時 工学部電気工学科教授）との出会いが無ければ今日が無かったことは言うまでもありません。また，昨年2月，朗報を心待ちにしていた父 克美（故人）が他界しました。お二人には墓前にてご報告申し上げる所存です。

本論文に関連する発表論文

1. 論文誌

- 1) 酒井重嘉, 三木一郎, 「太陽光発電システムが導入された交流配電系統における漏電遮断器の動作整定」, 太陽エネルギー学会誌, Vol.39, No. 1, pp. 45-51, 2012.1
- 2) 酒井重嘉, 廣井英幸, 榊原宏行, 山本和男, 「太陽光発電システムの直流配線に発生する過電圧」, 電気学会論文誌 B, Vol. 133, No. 10, pp. 777-784, 2013.10
- 3) 酒井重嘉, 三木一郎, 「接地方式が電圧形インバータから発生する高周波電流に及ぼす影響に関する実験的検討」, 電気設備学会誌, Vol. 33, No. 33, pp. 786-795, 2013.10

2. 口頭発表論文

- 1) 三浦英典, 泉敬介, 榊原宏行, 酒井重嘉, 「脳神経外科での DBS 手術における脳波形ノイズの調査について」, 電気設備学会全国大会, D-7, 2010.8.26
- 2) 金井伸仁, 橋本貴夫, 高橋信治, 酒井重嘉, 「インバータノイズ低減手法とその評価(その3)」, 電気設備学会全国大会, F-5, 2010.8.26
- 3) 中野肇, 酒井重嘉, 「某新聞社印刷工場の輪転機ノイズ対策」, 電気設備学会全国大会, A-19, 2010.8.27
- 4) 堀内宏樹, 千葉薫, 吉田進一, 酒井重嘉, 「雷サージによる常用発電機解列用遮断器の不要動作とその対策について」, 電気設備学会全国大会, B-16, 2010.8.27
- 5) 酒井重嘉, 千葉薫, 三木一郎, 「太陽電池アレイの対地静電容量が地絡保護協調に与える影響」, 日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会, E-61, 2010.11.4
- 6) 酒井重嘉, 三木一郎, 「太陽電池モジュールの対地静電容量」, 電気学会全国大会, 7-061, 2011.3.21
- 7) 酒井重嘉, 「交流地絡事故の直流配電系統への波及事例」, 電気設備学会全国大会, B-21, 2011.9.16
- 8) 廣井英幸, 酒井重嘉, 関健一, 榊原宏行, 山本和男, 「雷サージにより発生する太陽電池パネルの誘導電圧」, 電気設備学会全国大会, A-15, 2011.9.16
- 9) 坂本英雄, 酒井重嘉, 「蓄電設備の高周波特性」, 電気設備学会全国大会, H-15, 2011.9.16
- 10) 酒井重嘉, 三木一郎, 「太陽電池モジュールの対地静電容量」, 日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会, A2-11, 2011.9.21
- 11) 酒井重嘉, 廣井英幸, 榊原宏行, 山本和男, 「太陽光発電システムの直流配線に発生する過電圧」, 電気学会高電圧研究会, HV-11-089, 2011.11.30

- 1 2) Kazuyoshi Sakai, Kazuo Yamamoto, “A study of overvoltages occurring in DC wirings of a photovoltaic power generation system “, 31th ICLP, 263, 8.9.2012
- 1 3) 酒井重嘉, 「直流配電の電圧発振現象と負性抵抗負荷」, 電気設備学会全国大会, F-14, 2012.9.22
- 1 4) 酒井重嘉, 千葉薫, 「太陽光発電システムの耐圧試験における環境の影響」, 日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会, D6-120, 2012.11.9
- 1 5) Kazuo Yamamoto, Kenta Fujimoto, Akihiro Ametani, Kazuyoshi Sakai, Akira Higano, Kaoru watanabe, “Study of the Current Distribution and the Transient Magnetic Fields in the TOKYO SKYTR[®] Observatory”, ISET 2012, 27.11.2012
- 1 6) 大関崇, 増田淳, 柳田祥三, 西山聡, 吉富政宣, 酒井重嘉, 「太陽光発電システムの耐圧試験における環境の評価」, 第4回信頼性・システム技術研究会, 2013.2.13
- 1 7) 酒井重嘉, 「直流配電システムの混触事故」, 電気設備学会全国大会, G-19, 2013.9.4
- 1 8) 高橋寛明, 山本和男, 角紳一, 河端友貴, 酒井重嘉, 「電波塔の雷電流分流測定を目的としたロゴスキーコイルの周波数特性」, 電気学会東海支部連合大会, E4-4, 2013.9.25
- 1 9) Kazuyoshi Sakai, Kazuo Yamamoto, “Lightning Protection of Photovoltaic Power Generation System, Influence of grounding systems on overvoltages appearing on DC wirings “, 12th SIPDA, 36, 9.10.2013
- 2 0) 酒井重嘉, 廣井英幸, 榊原宏行, 山本和男, 「太陽光発電設備の直流配線に発生する雷過電圧の解析的検討」, 電気学会高電圧研究会, 2014.1.24