OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	GISの接地系における高周波サージに関する研究
Author(s)	野嶋, 健一
Citation	大阪大学, 1997, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3129329
rights	
Note	

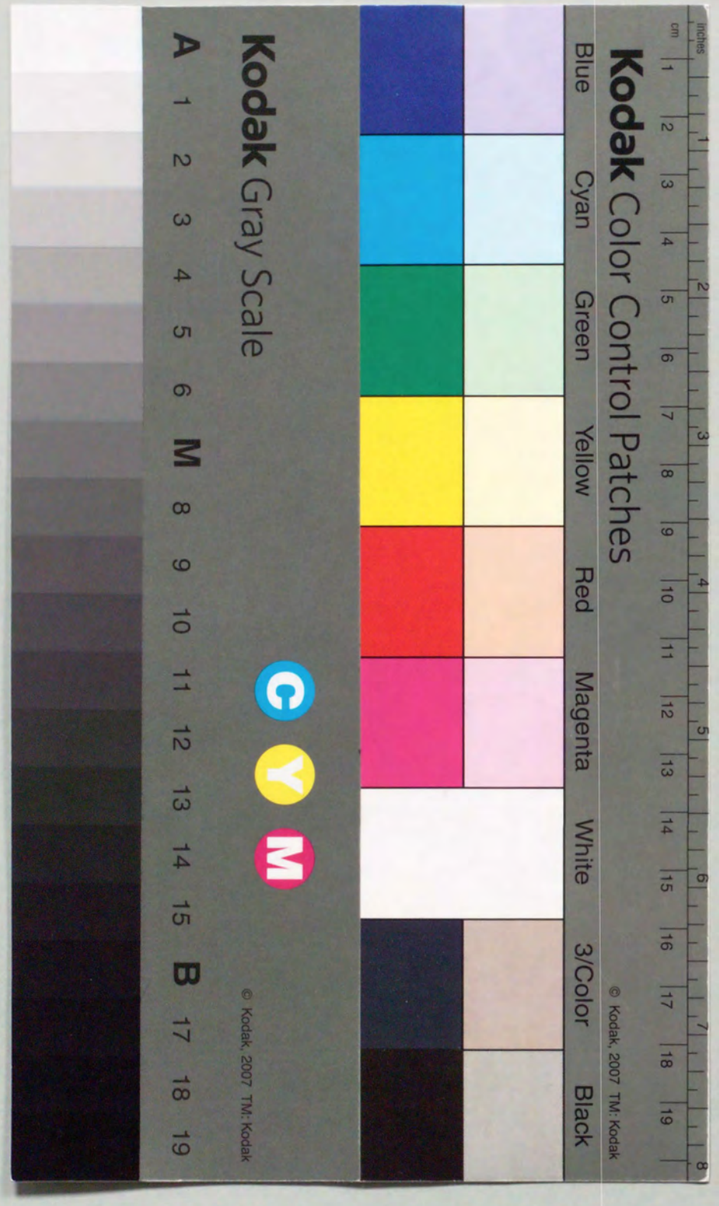
The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

GISの接地系における高周波サージに関する研究

野嶋健一



GISの接地系における高周波サージに関する研究

野　嶋　健　一

内容梗概

本論文は、筆者が（株）東芝　重電技術研究所において、ガス絶縁開閉装置(Gas Insulated Switchgear（GIS）)を適用した受変電設備の信頼性を向上するため、GISの接地系における高周波サージに関して行った研究をまとめたものである。

近年我国では、種々の電圧クラスの受変電設備において、GISが広く用いられるようになり、1000kV変電所の様に重要度の高い設備にもその適用が決まっている。また一方では、エレクトロニクス技術の進歩にともなって、受変電設備の制御装置や、電力機器に近接して設置される低電圧装置に半導体を用いた電子機器が多く用いられるようになってきた。これに伴って、GISで発生する高周波サージに対して電子機器の動作特性を保護することが受変電設備全体の信頼性を確保する上で重要になってきている。しかしながら、測定上の困難さから、これまで実規模のGIS受変電設備において、接地系に発生する高周波サージやそれによる低電圧装置への誘導障害について、実測・検討した例は少なかった。このような背景をもとに、本研究は、GISの接地系に発生する高周波サージの特徴を実測によって明らかにし、それによる誘導障害の抑制方法を解明することによって、GISを適用した受変電設備全体の信頼性を向上することを目的として行ったものである。

本研究では、実規模設備に適用可能な光伝送技術を応用した測定系を開発し、実測研究を行った。また、これまで電力分野ではあまり行われていなかった電磁界の伝搬現象解析コードも作成し、接地系への高周波サージの伝搬現象の解析を試みた。研究の成果は、実設備で発生した接地系サージによる低電圧装置への誘導障害の抑制対策として採用され実用された。本論文は、これら一連の研究成果を体系的に述べるものである。

本論文は、9章から構成される。

第1章では、序論として、本研究の背景と、GISにおける高周波サージの特徴と問題点について総括した。

接地系の高周波サージの発生源として、雷サージ、開閉サージ、地絡サージがあることを示し、接地系における高周波サージによる障害発生の可能性のある場所としては、GISタンク、ケーブルヘッド部、低圧制御回路、監視装置、周辺に設置された低電圧装

置があることを示した。

第2章では、GISの接地系における高周波サージに関する研究課題についてまとめた。

受変電設備全体の信頼性向上のためには、接地系に発生した高周波サージによる低電圧装置への誘導障害を抑制することが重要であることを述べた。

接地系の高周波サージやそれによる誘導障害の抑制法を検討するためには、実規模GIS受変電設備の接地系に発生する高周波サージやこれに対する接地系の応答を実測し明らかにする必要があることを示した。また、このためには、実設備での高周波電圧・電流測定に適用可能な測定系を開発することが必要であることも示した。

さらに、接地系に発生する高周波サージの内、特に避雷器が動作した時に発生する高周波サージとGISの開閉装置を動作させた時に発生する高周波サージについて調査する必要があることを述べた。また、GISの開閉装置の動作に起因して発生する10MHzを越す周波数の高いサージが周辺の低電圧装置に誘導障害を起こしやすいことを述べ、この誘導障害の抑制法を明らかにすることの重要性を示した。

第3章では、GISで発生する高周波サージ現象を研究するために開発した、光伝送技術を応用した電気信号／光信号変換電圧・電流測定システムについて述べた。

本システムを用いると20MHzまでの高周波サージ現象を実測することができることを示した。また、本システムを実規模GIS受変電設備における高周波サージの測定へ応用した具体例について紹介し、その有効性を示した。

第4章では、GIS変電所へ雷サージが進入して避雷器が動作した場合に、接地系に発生する高周波サージについて述べた。

550kVGIS変電所で行った実験の結果をもとに、接地系に発生するサージの周波数は数MHzであることを示した。また、接地系に大きな過渡電圧が発生するのは電流流入点近傍のみであることを示し、接地系のサージが問題となるのは避雷器近傍に限定されることを示した。

第5章では、GISを動作させた時に接地系に発生する高周波サージについて述べた。

66kVGIS－ケーブル設備をモデルケースとして選び、GCB投入時に接地系に発生する

高周波サージを実規模実験装置を用いて測定した結果について述べた。GIS開閉装置を動作させた時に接地系に発生するサージは、雷サージによって接地系に発生するサージよりも1桁以上も高い10MHzを越す周波数成分を含んでいることを実測した。また、10MHzを越す周波数の接地電位振動は、接地メッシュでは低減できないことを明らかにした。

第6章では、高周波サージの伝搬機構を理解する上で有効な過渡電磁界解析手法について述べた。

過渡的な電磁界を逐次空間的に計算するため、空間回路網法を用いた解析コードを作成した。本解析コードを同軸円筒線路におけるサージ伝搬現象の解析に適用してその有効性を確認するとともに、GISタンクの内部で発生した高周波サージに伴う電磁界が絶縁区分部を通して接地系へ伝搬してゆく現象を解析した。

第7章では、誘導障害の抑制方法について述べた。誘導障害の抑制法はその適用場所によって、発生源での抑制法、伝搬路での抑制法、低電圧装置での抑制法に大別されることを示した。GISの接地系に発生する10MHzを越す高周波サージによる低電圧装置への誘導障害を抑制するためには、GISタンク内部で発生した高周波サージがタンク外部へ伝搬するのを防止する伝搬路での抑制法がポイントであることを述べた。ここで言う伝搬路での抑制法とは、GISタンク内部で発生した高周波サージが接地系へ伝搬するのを防止するために、GISタンクの絶縁区分部や、GISタンクと電力ケーブル金属シースとの間の絶縁区分部や、電力ケーブル金属シースと変圧器タンクとの間の絶縁区分部をコンデンサを介して接続したり、可能なら直接接続する方法である。この抑制法の効果を、過渡電磁界解析と66kVの実験装置を用いた実験結果とから明らかにした。

第8章では、実設備における誘導障害の事例と7章の抑制方法を適用した結果について述べた。GISと電力ケーブルと変圧器からなる受電設備の2階に設置されたサイリスタ装置での誘導障害の実例を取り上げた。実際に誘導障害が起きたのと同様の実験建家をつくり、実設備での誘導障害を再現した。そして、接地系に発生した10MHzを越す高周波サージが誘導障害の原因となっていることを明らかにした。さらに、第7章で述べた伝搬路での抑制法によって10MHzを越す高周波サージが接地系に発生するのを防止でき、

これによる誘導障害を抑制できることも実証した。

第9章は結論であり、以上の研究で得られた結果をまとめ、本論文の総括とした。

目　次

第1章　緒言 1
1.1　研究の背景 1
1.2　ガス絶縁開閉器（GIS）の構成 2
1.3　受変電設備の接地系 5
1.4　GISにおける高周波サージ 6
1.5　まとめ 9
第1章　参考文献 10
第2章　GISの接地系における高周波サージに関する研究課題 13
2.1　まえがき 13
2.2　接地系に発生する高周波サージに関する知見 13
2.3　誘導障害に関する知見 21
2.4　接地系に発生する高周波サージに関する研究課題 22
2.5　接地系の高周波サージによる誘導障害の抑制法に関する研究課題 ... 22
2.6　研究の目的 22
2.7　まとめ 23
第2章　参考文献 24
第3章　GISにおける高周波サージの測定法の開発 27
3.1　まえがき 27
3.2　高周波電流の測定法 27
3.3　高電圧回路の高周波電圧の測定法 32
3.4　低電圧回路の高周波電圧の測定法 37
3.5　リアクトル電流遮断試験への適用例 37
3.6　550kVGISの断路器サージ電圧測定への適用例 40
3.7　まとめ 43
第3章　参考文献 44
第4章　雷によるGIS接地系の高周波サージ 45
4.1　まえがき 45

4.2 接地メッシュのインピーダンスの実測 45
4.2.1 接地系の構成 45
4.2.2 急峻波電流の流入方法 47
4.2.3 測定方法 48
4.2.4 測定結果 49
4.2.5 等価インピーダンス 51
4.2.6 解析波形との比較・検討 54
4.3 GISタンクに発生する高周波サージ電圧 56
4.3.1 実験方法 56
4.3.2 測定結果 57
4.3.3 解析波形との比較・検討 60
4.4 まとめ 62
第4章 参考文献 63
第5章 GIS開閉動作による接地系の高周波サージ 65
5.1 まえがき 65
5.2 実験方法 65
5.3 接地系に発生するサージ 66
5.4 接地メッシュの効果 70
5.5 まとめ 72
第5章 参考文献 73
第6章 高周波サージの伝搬機構の解析 75
6.1 まえがき 75
6.2 解析コード 75
6.3 タンク内部におけるサージ伝搬現象解析への適用 82
6.3.1 実測波形 82
6.3.2 解析結果 86
6.4 接地系へのサージ伝搬解析への適用 91
6.4.1 理論的検討 91
6.4.2 解析モデル 92
6.4.3 解析結果 93

6.5 まとめ 97
第6章 参考文献 98
第7章 低電圧装置への誘導障害の抑制法 99
7.1 一般的考え方 99
7.2 GISでの抑制法 100
7.3 抑制効果の解析 100
7.3.1 解析法 100
7.3.2 コンデンサ結合の効果 100
7.4 抑制効果の実測 108
7.4.1 実験方法 108
7.4.2 測定結果および検討 109
7.5 まとめ 111
第7章 参考文献 112
第8章 低電圧装置への誘導障害の実例と抑制方法の効果 113
8.1 まえがき 113
8.2 サイリスタ設備での障害事例 113
8.2.1 設備の構成 113
8.2.2 サイリスタの誤動作 114
8.2.3 接地改良の効果 114
8.2.4 障害の原因の実測 115
8.2.5 誘導に対するサイリスタの応答 117
8.2.6 抑制法の効果 120
8.3 他の設備での事例 123
8.3.1 275kV変電設備での事例 123
8.3.2 33kV受電設備での事例[4)5)] 125
8.4 まとめ 126
第8章 参考文献 127
第9章 結論 129
謝 辞 133
業績目録 135

第1章　緒言

1.1　研究の背景

ガス絶縁開閉器（Gas Insulated Switchgear、以下略してGISと言う）は、そのコンパクトさ、耐環境性の良さ等の理由から、広く受変電設備への適用が進んでいる。 Gその適用電圧は数10kVから500kVにわたっており、一般産業用の受変電設備から大容量送変電設備まで広範な受変電設備に実用されている。1000kV変電所への適用も決まっており、近い将来運転が開始される予定である。一方、近年のエレクトロニクス技術の進歩にともなって、受変電設備の制御装置や、受変電設備に近接して設置される低電圧装置に半導体素子を用いた電子機器が多く用いられるようになってきた。受変電設備の機能や運用効率の向上、および保守点検作業の効率向上を目的として、制御装置や監視装置への電子機器の適用は今後ますます増えるものと予想される[1)2)3)]。

受変電設備においては、送電線から雷が侵入した時や開閉装置を動作させた時等に高周波サージが発生する[4)5)]。受変電設備に近接して設置された低電圧装置がこれらの高周波サージにさらされると、誘導障害によって本来の動作特性を維持できない可能性がある。誘導障害による電子機器の動作不良は、受変電設備全体の信頼性を低下させる。このため、受変電設備における低電圧装置への誘導障害についての検討は、従来より行われてきた[6)7)8)]。

GISを適用した受変電設備ではそのコンパクトさゆえに制御装置等の電子機器を含んだ低電圧装置が従来よりもGIS等の高電圧機器に接近して設置される傾向にある。受変電設備の信頼性を確保して安定した電力供給を実現するためには、受変電設備で発生する高周波サージに対して電子機器の動作特性を保護することがますます重要になってきている。

この様な状況の中で、GISに特徴的な高周波サージの存在が明らかになっている[9)10)]。この高周波サージはGISの絶縁媒体として用いられるSF_6ガス中の放電の形成時間が数nsと非常に短いことに起因して生じ、10MHzを越す非常に高い周波数成分を含んでいる。GISの接地系にも同様の周波数の高周波サージが発生し得ることが指摘され[11)]、これによる誘導障害についても研究が始められた[12)13)14)]。しかし、これらの研究は主にGISの接地系の構造物の絶縁や人体への安全性についてのものが主であり、電子機器の動作特性

への影響という視点からの研究は少なかった。特に、実規模設備の接地系に発生する高周波サージの実測をもとにして電子機器の動作特性について研究した例はほとんどなかった。

1.2 ガス絶縁開閉器（GIS）の構成

GISでは、絶縁媒体として、従来の空気の代わりにSF_6ガスを用いている。SF_6ガスは絶縁耐力が高く、空気絶縁の場合に比べ、絶縁寸法を1/10～1/20に小さくできる。図1.1に、代表的な275kVGISの断面図の一例を示す。GISは、主母線、接地開閉器、ガス遮断器、変流器、断路器、計器用変圧器、ケーブル接続部等の各機器から構成される。変流器と計器用変圧器を除く機器の基本構造は、円筒形の金属タンクの内部に、やはり円筒形の高電圧導体をスペーサ等の絶縁物を用いて支持した同軸円筒電極構造である。

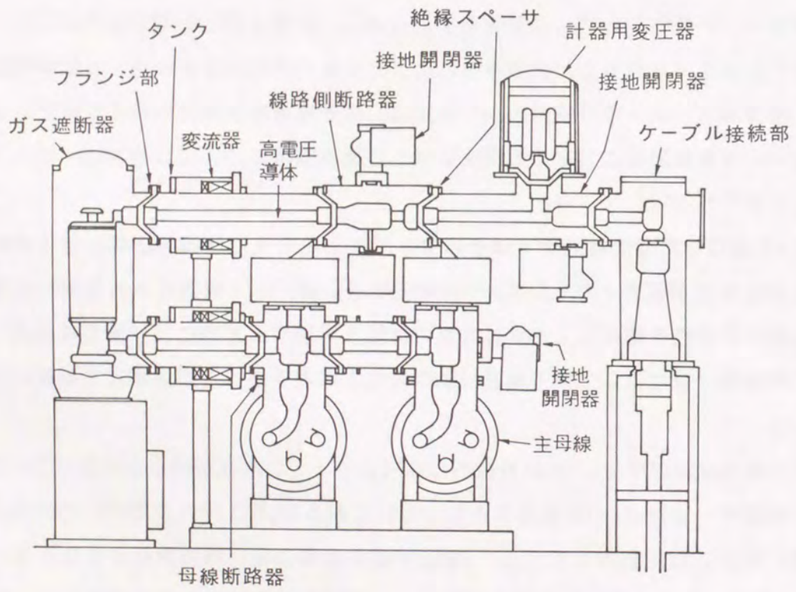


図 1.1　代表的構成の 275kV GIS の断面図

タンク内部には、絶縁媒体として、高気圧のSF_6ガスが封入される。各機器間は、それぞれの高電圧導体やタンクどおしを結合することによって連結される。タンク間はガスシール構造を持つフランジ部を接合することによって連結される。タンクは、接地線を用いて変電所の接地メッシュと接続される。フランジ部は、タンクを一点接地構成として商用周波数電流を流さないことを目的に電気的に絶縁される場合（絶縁フランジ構造）と、タンクを多点接地構成として商用周波数電流を積極的にタンクに流すことを目的に電気的に接続される場合とがある。積極的にタンクに電流を流す場合には、フランジ部においてタンク間を複数本の導体板で結合して低インピーダンスの商用周波電流回路を確保する。図1.1のGISはケーブルを通して給電されるため、ケーブル接続部を有している。ケーブルの終端部は、エポキシ製の絶縁物で支持されてGISの高圧導体に接続される。図1.2に代表的なケーブル接続部を示す。ケーブル接続部においては、ケーブル金属シースの防食や地絡電流検出を可能にする目的で、GISのタンクとケーブルの金属シースとは絶縁筒によって絶縁され、別々に接地されることが多い。

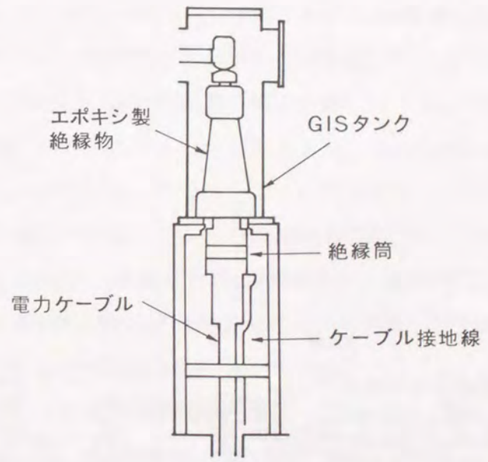


図 1.2　代表的なケーブル接続部構造

架空送電線を通してGISに給電する場合には、ブッシング部を用いる。図1.3に代表的な550kVGISの構造断面図を示す。このGISは、ブッシング部を介して架空送電線に接続される。ブッシング部には、送電線から伝搬してくる雷サージ過電圧を抑制する目的で避雷器が取り付けられている。避雷器は、非直線抵抗素子を用いて構成されており、雷サージ電流を接地系へ放電してGISへ伝搬する電圧を低減する機能を有している。この際、避雷器の接地線は、GISタンクとは絶縁した接地端子を通してタンク外部へ引き出され接地メッシュへ直接接続されることが多い。図1.3のGISは、図1.1のGISと同様に、主母線、接地開閉器、ガス遮断器、変流器、断路器、計器用変圧器等の種々の機器も有している。GISを変圧器と接続する場合、GIS母線を直接変圧器と接続する方法と、電力ケーブルを介して接続する方法とがあるが、いずれの場合においても、変圧器タンクとGISタンクや電力ケーブル金属シースとは直接には接続されずに絶縁区分され、別々に接地されることが多い。

通常の運転状態においてはGISタンクは接地電位であり、外部からの接触等に対しては、何等問題を生じない。このため、タンクには、GISの状態を監視するためにガス圧センサ等の種々のセンサが取り付けられたり、断路器や遮断器の制御装置が取り付けられたりする[1]。また、GISの周辺には、これらの監視装置や制御装置と接続された低電圧装置が配置されることも多い。

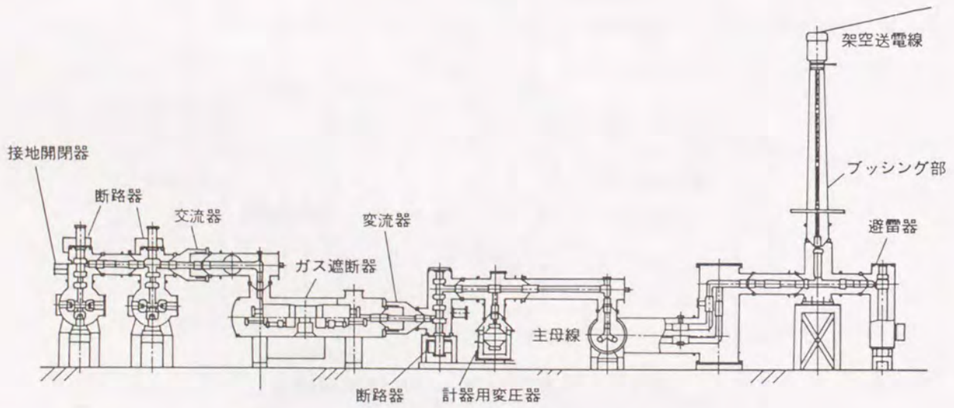


図 1.3　代表的な 550kV GIS の構造断面図

1.3　受変電設備の接地系

受変電設備の接地の主な目的としては、次の項目が考えられる。

①雷害防止の接地：雷撃電流を大地へ放電させて、機器事故を防止する。

②地絡電流による事故防止の接地：地絡電流を安全に大地へ放電させ、大地電位上昇による人身災害、機器事故を防止する。

③地絡検出用の接地：主回路に地絡が生じた時、保護継電装置の動作電流を確保し、故障個所の早期切り離しを計る。

④二次低圧回路接地：高圧回路と低圧回路の混触によって発生する二次側回路の災害を防止する。

⑤等電位化用の接地：人間が接触する可能性のある金属部分の電位差の発生を防止する。

⑥機能用の接地：電気防食、基準点電位等、設備の機能を維持する。

これらの目的を達成するために、接地杭や接地メッシュ、および接地線や導体板を用いて接地回路を構成する。GISを適用した受変電設備においてはGISタンクや支持架構もこの接地回路に接続され、接地系の構成要素となる。一般に、受変電設備の接地については、電気設備技術基準によって第1種接地工事（10Ω）以下にすることが規定されている。特に、地絡事故時に接地系へ流入する電流の大きい直接接地系においては、商用周波数の地絡事故電流による大地電位上昇値が1～2kVを越さないように接地抵抗値を小さくする。このための方法としては、受変電所構内全体に格子状に接地線をめぐらすメッシュ敷設方式が一般的である。このメッシュを主メッシュと呼ぶ。主メッシュのみで所望の抵抗値を得られない場合には、接地杭を土中に打ち込み、これと主メッシュとを連結して、接地系全体の接地インピーダンスを低減する方法がとられることもある。地絡電流が接地系に流入した場合、地表面上の2点間の電圧（歩幅電圧）や、鉄構や機器外箱やGISタンクなどの接地構造物と近傍地表面との間の電圧（接触電圧）が大きくなり人身の安全上問題となることがある。先に接地の目的②として示した様に、これらの電圧を下げることを目的として、GISの周辺にメッシュ間隔の密な補助メッシュを敷設し、GISタンク等を補助メッシュに接続する方法がとられることもある。接地系の構成は主に商用周波数の地絡電流を念頭に設計されており、高周波サージに対する配慮は少ないのが現状である。土中の導体やメッシュのインピーダンス特性についてはSunde[15]やShwarz[16]によって研究され、計算機を用いた解析手法の研究も行われている[17][18][19]。こ

れらの研究は雷インパルスを対象にしたものもあるが、商用周波数電流を対象にしたものが主であり、雷サージよりも周波数の高い高周波サージを対象にしたものは少ない。

1.4 GISにおける高周波サージ

GISに雷サージが侵入したり、GISを開閉動作させると、高電圧回路に高周波サージが発生する。GISで発生する主な高周波サージの種類と特徴を表1.1に示す[14]。

雷サージは、送電鉄塔や架空地線に落雷して、逆フラッシオーバが生じたり、遮蔽失敗によって送電線に直撃雷が生じた場合に、送電線に沿ってGISへ到達する。標準雷インパルス波形は、規約波頭長が1.2μｓで規約波尾長が50μｓである1.2/50μｓ波形として規定されているが、一般にGISの高電圧回路内を伝搬する際に分波・反射現象を生じて振動成分を含む複雑な波形となる。雷サージがGISへ到達した際に避雷器が動作すると、立ち上がり時間が100ns程度の急峻な電流が接地系へ流入する。

開閉サージは、断路器や遮断器や接地装置を動作させた時に発生する。GISを適用した設備においては、GISの開閉装置を動作させた時に開閉装置の電極間で発生するSF_6ガス中の放電現象に起因して、10MHzを超す非常に高い周波数成分を含んでいる。接地装置の投入の場合には、GISの高電圧導体に残留した電荷が、直接にGISタンクへ放電される。

地絡サージは、GISの高電圧導体とタンク内面との間でSF_6ガスの放電が生じた時に発生する。開閉サージの場合と同様に、SF6ガス中の放電現象に起因した10MHzを超す非常に高い周波数成分を含んでいる。

これらの高周波サージが接地系へ伝搬すると、種々の誘導障害が発生する可能性があることが知られている。主な誘導障害を表1.2に示す[11)12)13)14)]。

GISタンクにおいては、絶縁フランジ間に高周波過電圧が発生して絶縁破壊が生じ、場合によっては絶縁フランジ部を構成する絶縁物を破損することも考えられる。また、GISタンクや架構の対地電位が上昇すると、点検作業員等が接触したり近接している場合に、感電ショックを受ける恐れもある。避雷器の接地端子部の様に、導体がタンクと絶縁されてタンク外部へ引き出される端子部においては、導体端子とタンクとの間に過電圧が発生して絶縁破壊が生じ、絶縁物が破損することも考えられる。

ケーブル接続部においても、タンクとケーブル金属シースとは絶縁フランジ部と同

様に絶縁物によって絶縁されることが多いので、絶縁物の絶縁破壊や破損の可能性がある。

また、GISタンクに取り付けられた低電圧装置の回路の内部へ侵入した高周波サージが、回路内部および保護回路内部で絶縁破壊を生じさせ、誤動作を生じさせたり装置全体を動作不能にすることが考えられる。絶縁破壊を生じない場合でも、信号線に侵入した高周波サージが誤動作を発生させる可能性がある。

GISに取り付けた監視装置に高周波サージが伝搬すると、センサの絶縁破壊による破損やそれにともなう誤動作や機能停止が生じることが考えられる。また、監視装置の制御盤まで高周波サージが伝搬して、操作員に感電ショックを与えることも考えられる。

GISと直接には接続されていなくても、接地系を介してその周辺に設置されている低電圧装置に高周波サージが伝搬することも考えられる。この場合、その装置の絶縁破壊や機能停止、誤動作といった障害を生じる可能性がある。

近年、エレクトロニクス機器の適用が広まり、GISの監視装置や制御回路等に半導体素子が多く用いられる様になっている。半導体の集積度の向上に伴って、信号レベルは低下する傾向にある。エレクトロニクス機器の受変電設備への適用は、今後さらに進むものと考えられ、電力システム全体の信頼性向上のためには、半導体素子を含む低電圧装置への誘導障害について研究する必要がある。特に、高電圧導体が通常の運転状態では接地電位であるタンクでおおわれており低電圧装置が近接して設置されることの多いGISにおいては、この誘導障害について研究しておくことが重要である。

表1.1　高周波サージの種類と特徴[14)]

高周波サージ	動作機器	特　徴
雷サージ	無し 避雷器	・架空線からGISへ伝搬する。 ・標準電圧波形は1.2/50μｓ。 ・一般に、GIS中での伝搬・反射によって数ＭＨｚの振動成分を含む複雑な波形となる。 ・避雷器が動作した場合には、急峻な立ち上がりの放電電流が接地系へ放電される。
開閉サージ	断路器、遮断器、接地開閉器	・左記の開閉装置を動作させたときに発生する。 ・GISにつながる回路全体で生じる数10ｋＨｚ～数100ｋＨｚの比較的遅い周波数成分と、GIS中での局所的な伝搬・反射による数ＭＨｚ～数10ＭＨｚの非常に速い周波数成分とを含む。 ・接地装置の投入の場合には、GISの高電圧導体に残留した電荷が直接にGISタンクへ放電される。
地絡サージ	無し	・接地開閉器の動作時と同様に、接地系と高電圧導体が直接接続される。 ・雷サージ過電圧印加時の地絡サージが最も大きい。 ・数ＭＨｚ～数10ＭＨｚの非常に高い周波数成分を含む。 商用周波電圧印加時には商用周波数成分にこの高周波成分が重畳する。

表1.2　接地系の高周波サージによる障害

接地系の高周波サージ発生箇所	障　害
GISタンク	・絶縁フランジ端子間の絶縁破壊、破損。 ・人体へのショック。 避雷器タンクと絶縁された接地端子とタンク間との間での絶縁破壊。
ケーブル接続部	・シース絶縁部の破壊。 （循環電流または短絡通電によるシース損傷） ・人体へのショック。
低圧制御・保護回路	・制御および保護回路内部での絶縁破壊。これに伴う誤動作または動作不能。 ・制御盤へのサージ伝搬、人体ショック。
監視装置	・センサの絶縁破壊。 ・誤動作または機能停止。 ・制御盤へのサージ伝搬、人体ショック。
周辺に設置された低電圧装置	・エレクトロニクス素子の破壊または機能停止、誤動作。

1.5　まとめ

本章では、研究の背景を紹介し、 GISに近接して接地される低電圧装置への誘導障害について研究することの必要性を述べた。また、GISの接地系に発生する高周波サージの特徴と主な誘導障害についてとりまとめて紹介した。

第1章　参考文献

1)センサ技術適用調査専門委員会：「電力設備へのセンサ適用技術」、
電気協同研究、第46巻、第4号、平成2年

2)G. Schett, F. Engler, K. Pettersson, A. Kaczkowski, K. Frei : " The Integration of Secondary Technology and Novel Sencsors into GIS", Cigre 23/13 Joint session, 23/13-01, 1994

3)H. Blaum, H. Karrenbauer, R. Speh, K. Feser, A. Gemper : " Integrated Diagnostic for a Modern High Voltage GIS", Cigre 23/13, 23/13-12, 1994

4)関根、河野、豊田、川瀬、松浦：「送配電工学」、オーム社、1989

5)河野：「系統絶縁論」、コロナ社、1984

6)低圧制御回路絶縁調査専門委員会：「低圧制御回路絶縁設計」、
電気協同研究、第32巻、第2号、1976

7)制御機器調査専門委員会：「制御機器の雑音と対策」、電気学会技術報告
（Ⅱ部）　第123号、昭56

8)酒井、森、大矢：「ノイズによる誤動作と対策」、日刊工業新聞社、1990

9)Boggs S. A., Chu F. Y., Fujimoto N. : "Disconnct Switch Induced Transients and Trapped Charge in GIS", IEEE Trans., Vol.PAS-101, No.10, p.p.3593-3602, October 1982

10)H. Murase, I. Ohshima, H. Aoyagi, I. Miwa : "Measurement of Transient Voltages Induced by Disconnect Switch Operation", IEEE Trans., Vol.PAS-104, No.1, p.p.157-165, January 1985

11)N. Fujimoto, E.P. Dick, S.A. Boggs and G.L. Ford : "Transient Potential Rise In Gas Insulated Substations - Experimental Studies", IEEE Trans., Vol. PAS-101, No.10, p.p.3603-3609 October 1982

12)E. P. Dick, N. Fujimoto, G. L. Ford, S. Harvey : "Transient Potential Rise in Gas Insulated Substation - Problem Identification and Mitigation" , IEEE Trans., Vol. PAS-101, No.10, p.p.3610-3618, October 1982

13)G. L. Ford, L. A. Geddes : "Transient Grounding Potential Rise In Gas Insulated Substations - Assesment of Shock Hazard", IEEE Trans., Vol.PAS-101, No.10, p.p.223-233, October 1982

14)ガス絶縁開閉装置誘導現象調査専門委員会：「ガス絶縁開閉装置における
低圧側への誘導現象」、電気学会技術報告（Ⅱ部）第273号、昭63

15)E. D. Sunde, : "Surge Characteristics of a Buried Bare Wire", AIEE Transactions, Vol.59, p.p.987-991, 1940

16)S. J. Schwarz : " Anlytical Expressions for the Grounding System", AIEE Trans., No.8, 1954

17)R. Verma, D. Mukhedkar : "Fundamental Considerations and Impulse Impedance of Grounding Grid", IEEE Trans., Vol.PAS-100, No.3, p.p.1023-1030, March 1981

18)R. Velazquez, D. Mukhedkar : "Analytical Modelling of Grounding Electrodes Transient Behavior", IEEE Trans. On PAS-103, No.6, p.p.1314-1322, June 1984

19)A. D. Papalexopoulos, A. P. Meliopoulos : "Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems", IEEE Trans. On Power Delibery, Vol.PWRD-2, No.4, p.p.1073-1081, October 1987

第2章　GISの接地系における高周波サージに関する研究課題

2.1　まえがき

前章で述べた様に、GISに雷サージが侵入したりGISの開閉装置を動作させたりすると、高電圧回路に高周波サージが発生する。この高周波サージが接地系へ伝搬すると、通常の運転状態では接地電位であるGISタンク等の接地系に高周波過渡電圧が発生し[1)2)3)]、周辺の低電圧装置等に誘導障害を生じさせることがある[4)5)]。GISを含む受変電設備全体の信頼性を向上させるためには、GISの接地系における高周波サージ現象を把握し、誘導障害の抑制方法を明らかにすることが重要である。このためには、実規模設備において、接地系に発生する高周波サージ電圧・電流の特徴を実測したり、低電圧装置への誘導現象や誘導障害の抑制方法を研究することが重要である。低電圧装置への誘導現象を念頭においた絶縁設計法の検討は、日本においても1976年電気協同研究会低圧制御回路絶縁設計専門委員会等[6)7)]において調査検討が行われた。しかし、この中では、GISに特徴的な10MHzを超す高周波サージは取り扱っていない。GISに特徴的な高周波サージによる誘導現象については、1988年に電気学会ガス絶縁開閉装置誘導現象調査専門委員会において調査が行われている[8)]。しかし、その中でも、実規模設備において、高周波サージの発生、低電圧圧装置への誘導現象、およびその抑制法の検証までを通して実測検討した報告は紹介されていない。また、最近、受変電設備で使用されることの多いパワーエレクトロニクス機器に関連した誘導障害の調査も行われているが[9)]、やはりGISで発生する高周波サージについて具体的に実測調査した例は報告されていない。このように、従来は、GISで発生する高周波サージに起因する誘導障害を実規模設備で実測研究した例はほとんど行われていなかった。この理由の一つとして、従来は実変電所や実GISを用いた実験を行う場合の測定系へのノイズの影響が大きく、有効な測定を行い難かったことが考えられる。しかし、近年、光技術を応用した測定技術が進歩し、実フィールドにおいてもノイズの影響の無い正確な測定を行えるための条件が整ってきた 。

2.2　接地系に発生する高周波サージに関する知見

GISを接地面上に敷設した場合、高周波サージ電流が流れる経路として、GISの高電

導体とタンクおよび接地面が考えられる[8]。高周波サージ電流は表皮効果によって図2.1に示す様に、高電圧導体、タンク内面、タンク外面、接地面の表面近傍のみを流れる。一般に表皮深さδは

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f\pi\mu\sigma}} \cdots (2.1)$$

と表される。このδを用いて、電流密度が1%になる表皮深さ$\delta_{1\%}$は

$$\delta_{1\%} = 4.6\delta \cdots (2.2)$$

と表される。(2.1)式および(2.2)式から分かるように、MHz領域の高周波サージに対しては、$\delta_{1\%}$は1mm以下と非常に小さくなる。これは、GISの高電圧導体とタンク内面とから構成される伝送線路内の電磁界と、タンク外面と接地面とから構成される伝送線路内の電磁界とがお互いに干渉しないことを示しており、これら2つの伝送線路を別々のものとして取り扱えることを示している。Fujimoto[2]等は、この様な伝送線路を用いて高周波サージの接地系への伝搬回路をモデル化した。この方法では、接地面上に配置したGISを、上記2つの伝送線路の直列回路としてモデル化する。この方法による、送電線に接続されたGISの伝送線路モデルを、図2.2に示す。 GIS高電圧導体とタンク内面からなる線路の特性インピーダンスZ_1、送電線路の特性インピーダンスZ_2およびタンク外面と接地面とからなる線路の特性インピーダンスZ_3とを用いて、この回路構成でのサージの透過・反射現象を検討することができる。

高電圧回路に発生した高周波サージが、接地系に伝搬すると接地系にも高周波サージが発生する。接地系に発生する高周波サージは、その発生原因となる高電圧回路に発生するサージの種類を基に、次の3種類に大別することができる[8]。

(1)雷によって接地系に発生する高周波サージ

(2)GISの開閉によって接地系に発生する高周波サージ

(3)接地開閉器の投入および地絡によって接地系に発生する高周波サージ

以下に、それぞれの接地系の高周波サージの発生様相の特徴を述べる。

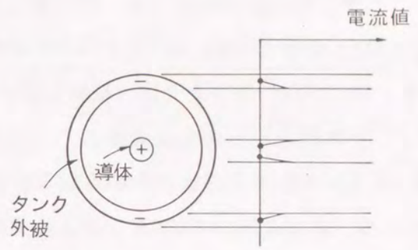
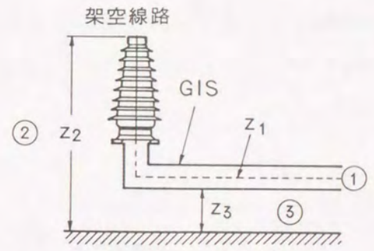
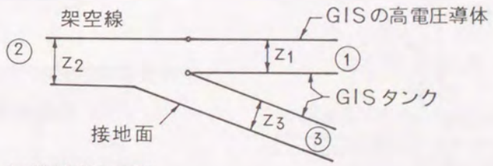


図 2.1　高周波サージ電流の分布



(a) GISと架空線路



(b) 伝送線路モデル

図 2.2　送電線に接続されたGISの伝送線路モデル

(1) 雷によって接地系に発生する高周波サージ

送電線で逆フラッシオーバや遮蔽失敗が生じると、架空線に雷サージが侵入し、これが変電所まで伝搬してきてGISへ印加される。GIS入り口の代表的構成と伝送線路モデルとを図2.3(a)、(b)に示す。図2.3(a)に示すように、伝搬してきた雷サージは、GISの入り口でGISの高圧導体とタンク内面とからなる伝搬路と、 GISタンク外面と接地面とからなる伝搬路とに伝搬する。GISタンクと接地面とからなる伝搬路に伝搬した成分によって接地系にサージが生じる。送電線路からGISタンクと接地面とからなる伝送線路へ伝搬する大きさは、送電線の特性インピーダンスZ_1、GISの高電圧導体とタンク内面とからなる線路の特性インピーダンスZ_2、タンク外面と接地面とからなる線路の特性インピーダンスZ_3、およびGISタンクの接地線のインピーダンス（主にインダクタンス成分L）とによって決まる。接地線を考慮した場合の送電線からみたGISの等価回路を図2.3(b)に示す。図2.3(b)において、送電線からGIS側へのサージの透過係数Tは、

$$T = \frac{2Z_L}{Z_L + Z_2} = \frac{2\left(Z_1 + \dfrac{j\omega L Z_3}{Z_3 + j\omega L}\right)}{Z_1 + Z_2 + \dfrac{j\omega L Z_3}{Z_3 + j\omega L}} \quad \cdots (2.3)$$

と表される。

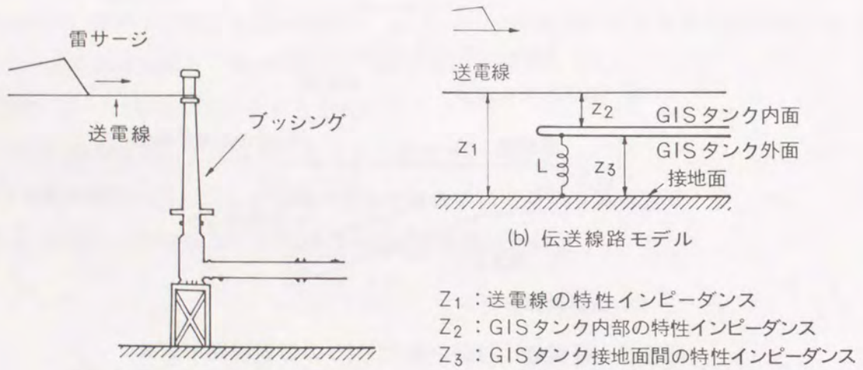


図2.3 GIS入り口の構成

GIS高電圧導体とタンク内面とからなる線路とタンク外面と接地面からなる線路は直列であるので、タンク外面と接地面とからなる線路への透過係数T_{32}は

$$T_{32} = \frac{2Z_L}{Z_L + Z_2} \times \frac{\dfrac{j\omega L Z_3}{Z_3 + j\omega L}}{Z_L} = \frac{2\dfrac{j\omega L Z_3}{Z_3 + j\omega L}}{Z_1 + Z_2 + \dfrac{j\omega L Z_3}{Z_3 + j\omega L}} \quad \cdots (2.4)$$

となる。一般に、雷サージの波頭峻度に対しては接地線のインピーダンスは十分に低く、(2.4)式においてωLが小さくなる。このため、T_{32}が小さくなって接地線の効果が大きい。したがって、この機構で接地系に発生するサージ電圧は一般にそれほど大きくはならない。

雷サージがGISに伝搬し、避雷器が動作すると、接地系へ避雷器の放電電流が流入する。図2.4(a), (b)は避雷器をふくむGIS入り口の構成と、その等価回路を示す。避雷器が動作した場合の避雷器の放電電流(I_1+I_2)は数kA～数10kAにものぼる。図2.5にGISの避雷器の放電電流の解析例を示す[10]。放電電流の波頭部にGIS回路に起因した数MHzの振動電流が重畳している。これは、GISのインダクタンスと静電容量とを通して流れる電流I_2に対応していた。重畳した振動によって波形の初期部の実質的な立ち上がり時間は100ns程度と短くなっている。

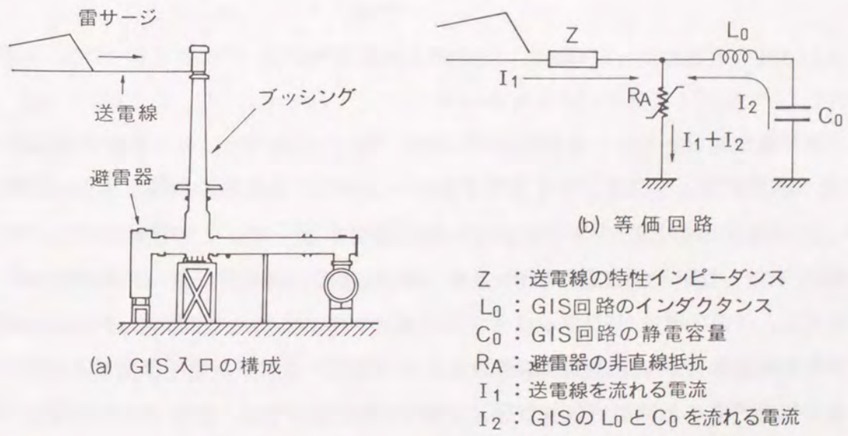
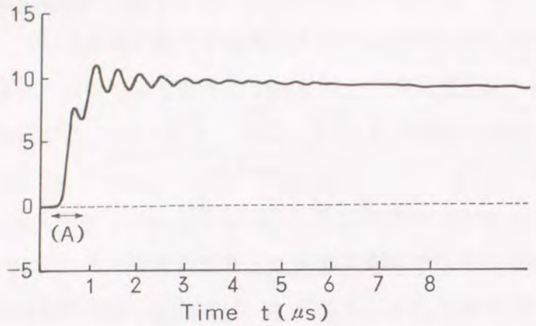


図2.4 GIS入り口の構成と等価回路



縦軸：5kA／div
横軸：1μs／div

図2.5　避雷器放電電流

縮小モデルを用いた実験からこのような急峻な電流に対しては接地メッシュのインピーダンスが大きくなることを示した報告がある[11][12]。この場合流入サージ電流と同様の周波数の高周波サージ電圧が接地系に発生するものと考えられる。このような急峻波電流によって接地系に発生する高周波サージ電流の大きさや周波数を実設備で実測した報告はこれまであまりなかった。

(2) GISの開閉によって接地系に発生する高周波サージ

遮断機を投入したり、断路器を開閉動作させたりすると、開閉装置の電極間でSF_6ガス中放電が生じ、立ち上がり時間が数ns～20ns程度と非常に急峻なステップ波電圧がGISの高電圧導体とGISタンク内面との間に発生する[4][13][14]。この急峻ステップ波はGIS内部で伝搬と反射を繰り返し数MHz～数10MHzの非常に周波数の高い高周波サージを発生させる。高電圧導体がGISタンクで完全に覆われている場合には、GISタンク内部で発生した高周波サージはGIS高電圧導体とタンク内面とからなる線路を伝搬するのみで、接地系へ伝搬することはない。しかし、実際のGISにおいては、絶縁フランジ部やブッシング部やケーブルヘッド部の様に、タンクが高電圧導体を覆いつくしていない部分があり、この部分を通して接地系へ高周波サージが伝搬する[2][5][8]。一例として、GISと電力

ケーブルとの接続部であるケーブルヘッド部での接地系への伝搬路を図2.6に示す[5]。実器においては、GISタンクや電力ケーブル金属シースには接地線が接続される。しかし、GISの開閉によって発生するサージに含まれる数MHz～数10MHz成分に対しては、接地線のインピーダンス（主にインダクタンスによる）が大きくなり、GISタンクや電力ケーブルシースに電圧が発生するものと考えられる。図2.6の構成は、図2.7の様な伝送線路モデルとして現される。図2.7において、GIS高電圧導体とタンク内面とからなる伝送線路からGISタンクと大地からなる伝送線路への進行電圧波の移行係数T_{30}は、

$$T_{30}=\frac{-2\dfrac{j\omega LZ_3}{Z_3+j\omega L}}{Z_0+Z_1+\dfrac{j\omega LZ_2}{Z_2+j\omega L}+\dfrac{j\omega LZ_3}{Z_3+j\omega L}}\cdot\frac{2\omega LZ_3(\omega L-jZ_2)}{(Z_0+Z_1)Z_2Z_3-\omega^2L^2(Z_0+Z_1+Z_2+Z_3)+j\omega L\{(Z_0+Z_1)(Z_2+Z_3)+2Z_2Z_3\}} \quad (2.5)$$

ただし、Z_0：GISの高電圧導体－タンク間の特性インピーダンス

Z_1：電力ケーブルの高電圧導体－金属シース間の特性インピーダンス

Z_2：電力ケーブル金属シース－大地間の特性インピーダンス

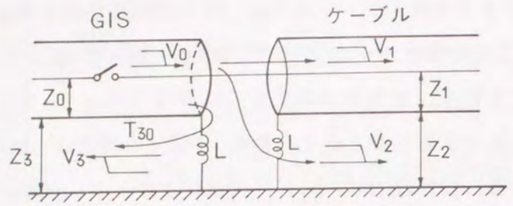
Z_3：GISのタンク－大地間の特性インピーダンス

L　：接地線のインダクタンス

ω　：2πf、　　f：周波数

となる。GISおよび電力ケーブルの代表的形状から、例えばZ_0＝70Ω、Z_1＝30Ω、Z_2＝50Ω、Z_3＝30Ωとして、更にL＝5μHとして(2.5)式を横軸を周波数として示すと、図2.8の様になる[5]。図2.8は、接地線のインダクタンスの効果によって、進行波に含まれる高い周波数成分ほど接地系へ伝搬する割合が増えることを示している。この場合、例えばGISタンク内部で発生したサージの10MHz成分は、その35%もが接地系へ伝搬して、接地系に高周波サージを発生させることになる。絶縁フランジ部においても、これと同様の機構で接地系へ高周波サージが伝搬するものと考えれる。

この様な高周波サージが接地系に伝搬したときに接地系に発生する高周波サージや接地メッシュを含む接地系の応答を実規模のGISを用いて実測した例は、これまでほとんどなかった。



V_0：発生進行電圧波
V_1：電力ケーブル導体 － 電力ケーブル金属シース間への伝搬波
V_2：電力ケーブル金属シース － 大地間への伝搬波
V_3：GISタンク － 大地間への伝搬波
Z_0：GIS導体 － タンク間の特性インピーダンス
Z_1：電力ケーブル導体 － 電力ケーブル金属シース間の特性インピーダンス
Z_2：電力ケーブル金属シース － 大地間の特性インピーダンス
Z_3：GISタンク － 大地間の特性インピーダンス
L ：接地線のインダクタンス
T_{30}：GISタンク － 大地間への進行電圧波の移行係数

図2.6　GIS内部で発生した進行電圧波の接地系への伝搬

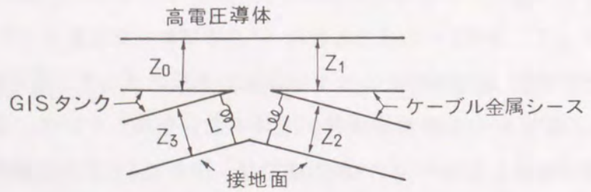


図2.7　ケーブル接続部の伝送線路モデル

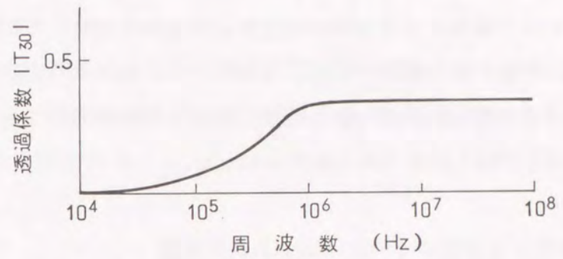


図2.8　GIS内部からGISタンク・大地間への進行波の透過係数
（図2.6において、$Z_0=70\Omega$, $Z_1=30\Omega$, $Z_2=50\Omega$, $Z_3=30\Omega$, $L=5\mu H$として計算）

(3) 接地開閉器の投入および地絡によって接地系に発生する高周波サージ

接地開閉器を投入したり地絡が発生した場合にも、開閉サージと同様にSF_6ガス中の放電に起因した非常に急峻な高周波サージが発生する。急峻波サージは開閉サージの場合と同様にGISの高電圧導体とGISタンクとの間に発生し、絶縁フランジ部やブッシング部やケーブルヘッド部を通して接地系へ伝搬し、接地系に高周波サージを発生させる。接地開閉器の投入や地絡によって高周波サージの接地系への伝搬現象は開閉サージの場合と同様と考えられる。

2.3　誘導障害に関する知見

接地系へ高周波サージが伝搬すると、通常の運転状態では接地電位であったGISタンクの電位を上昇させたり、GISの周辺に設置された制御機器等の低電圧装置に誘導電圧・電流を発生させたりする。GISのタンク電位が上昇するとタンクの絶縁区分部で絶縁破壊を生じたり、これに触れている人体にショックを生じたりする。低電圧装置に発生した誘導電圧・電流は低電圧装置の誤動作や動作不能を引き起こす。誘導電圧・電流の侵入経路としては、電源線、信号入力線・出力線などの導体を通してのルートが主な

ものと考えられている。GISから接地系へ伝搬するサージは数MHz～数10MHzの非常に高い周波数成分を含んでいると考えられ、$\partial V/\partial t$および$\partial I/\partial t$が大きいためにわずかな静電結合や電磁結合でも信号線等に大きな誘導電圧や誘導電流を発生しやすいものと考えられる[7)13)]。特に10MHzを越す高周波サージによる誘導レベルはかなり大きくなるものと予想されるが、これによる低電圧装置の動作特性に対する誘導障害について、実規模の機器を用いて研究された例はこれまでほとんどなかった。

2.4 接地系に発生する高周波サージに関する研究課題

2.2節で述べた様に、GISの接地系に発生する高周波サージは数MHz～数10MHzという非常に高い周波数成分を含むものと考えられる。これに対して、現状の接地設計は主に商用周波数の電圧・電流を対象にしており、高周波サージに対する接地メッシュ等の接地系の応答特性には未知の部分が多い。このため、誘導障害の抑制法を検討するに当たって、実規模の受変電設備の接地系に発生する高周波サージを実測し、これに対する接地系の応答特性を実測し検討しておく必要がある。これに先立って、接地系にサージが存在する中で、正確に発生電圧を測定するための測定技術の確立が必要である。また、実設備での接地系への高周波サージの伝搬機構を理解するために、3次元的な構造を考慮した解析技術の確立も必要である。

2.5 接地系の高周波サージによる誘導障害の抑制法に関する研究課題

第2.3節で述べたように、GISの開閉サージによって接地系に生じた高周波サージによる低電圧装置への誘導電圧・電流は大きくなるものと考えられる。しかし、この誘導現象を実規模装置で実測し検討した例は少ない。実規模装置を用いてこの誘導現象を実測し、誘導現象の特徴を明らかにする必要がある。また、この誘導現象の抑制方法についても検討し、その効果を実規模装置を用いて確認する必要もある。

2.6 研究の目的

本研究の目的は、GISの接地系における高周波サージの発生機構の把握と、接地系

に発生する高周波サージの特徴の解明、ならびに接地系の高周波サージによる低電圧装置への誘導特性の解明を行い、その抑制方法を確立して、GISを適用した電力設備全体の信頼性を向上することにある。

このために、第2.4節に示した接地系に発生する高周波サージに関する研究課題ならびに第2.5節に示し接地系の高周波サージによる誘導障害の抑制法に関する研究課題を解明することを目的とする。

2.7 まとめ

本章では、GIS接地系に発生する高周波サージに関するこれまでの知見を取りまとめて示し、今後増えることが予想されるGISと低電圧装置が近接配置された電力設備全体の信頼性の向上を図るために必要な接地系サージに関する研究課題を整理した。

第２章　参考文献

1)N. Fujimoto, E.P. Dick, S.A. Boggs and G.L. Ford : “Transient Potential Rise In Gas Insulated Substations - Experimental Studies”, IEEE Trans., Vol. PAS-101, No.10, p.p.3603-3609 October 1982

2)E. P. Dick, N. Fujimoto, G. L. Ford, S. Harvey : “Transient Potential Rise in Gas Insulated Substation - Problem Identification and Mitigation” , IEEE Trans., Vol. PAS-101, No.10, p.p.3610-3618, October 1982

3)G. L. Ford, L. A. Geddes : “Transient Grounding Potential Rise in Gas Insulated Substations - Assesment of Shock Hazard”, IEEE Trans., Vol.PAS-101, No.10, p.p.223-233, October 1982

4)Working Group 33/13-09 : “Very Fast Transient Phenomena Associated with Gas Insulated Substations”, Cigre 1988 Session, 33-13, 1988

5) 野嶋、西脇、和田、柳父：「ケーブル系GISの開閉サージによるエレクトロニクス機器への誘導障害」、電気学会論文誌　B、111巻、3号、p.p314-323, 平成３年

6) 電気協同研究会低圧制御系回路絶縁設計専門委員会：「低圧制御回路絶縁設計」、電気協同研究、32、No.2、1976

7) 制御機器調査専門委員会：「制御機器の雑音と対策」、電気学会技術報告（Ⅱ部）第123号、昭56

8) ガス絶縁開閉装置誘導現象調査専門委員会：「ガス絶縁開閉装置における低圧側への誘導現象」、電気学会技術報告（Ⅱ部）第273号、昭63

9)半導体電力変換器の電磁波障害協同研究委員会：「パワーエレクトロニクス機器の電磁波ノイズ」、電気学会技術報告、第545号、1995

10)S. Karaki, T. Yamazaki, K. Nojima, T. Yokota, H. Murase, Takahashi, S. Kojima : “Transient Impedance of GIS Grounding Grid”, IEEE PWRD, Vol.10, No.2, p.p.723-731, April 1995

11) B. R. Gupta, V. K. Sign : “Impulse Impedance of Rectangular Grounding Grids”, IEEE PWRD, Vol.7, No.1, p.p. 214-218, January 1992

12)Boggs S. A., Chu F. Y., Fujimoto N. : “Disconnct Switch Induced Transients and Trapped Charge in GIS”, IEEE Trans., Vol.PAS-101, No.10, p.p.3593-3602, October 1982

13)H. Murase, I. Ohshima, H. Aoyagi, I. Miwa : “Measurement of Transient Voltages Induced by Disconnect Switch Operation”, IEEE Trans., Vol.PAS-104, No.1, p.p.157-165, January 1985

14)野嶋、大島：「受変電設備とEMI/EMC」、電気学会誌、110巻、11号、p.p.931-938、平成2年

第3章　GISにおける高周波サージの測定法の開発

3.1　まえがき

接地系に発生する高周波サージを研究するためには、高電圧回路に発生する高周波電圧や電流、および接地メッシュや接地線やGISタンク等からなる接地系に流れる高周波電流や電圧を、測定系への誘導ノイズの影響なく測定する必要がある。特に、電圧と電流とを同時に測定したり、複数の測定点の電圧を同時に測定しようとする場合には、測定線がループ回路を構成しやすくなり測定線への誘導ノイズが大きな問題となる。変流器(CT)を用いた電流測定に際して、電流を測定する点の電位が高周波振動する場合には、CTからの信号線の電位が振動してしまい正確な測定は難しい。このような、測定系への誘導ノイズを防ぐ方法として効果的なのが、光伝送技術を測定信号の伝送に適用する方法である。電位が高周波振動する導体に流れる電流を測定し、同時に導体の電位を測定できる測定系を構成する目的で、光伝送技術を応用した高周波電圧測定法と高周波電圧測定法を開発した。

3.2　高周波電流の測定法

開発した高周波電流測定系の基本構成は、高周波CTとアナログ光伝送系とからなる[1)]。アナログ光伝送系は、電気信号／光信号変換器（E/O変換器）と光信号／電気信号変換機(O/E変換器)とからなる。表3.1はアナログ光伝送系の特性を示す。

表3.1　光伝送系の特性

	E/O	O/E
伝送帯域	DC to 30 MHz	
入力／出力インピーダンス	1 MΩ	50Ω
入力／出力信号電圧	±1.0V	±0.5V
立ち上り時間	15 ns or less	
立ち下り時間	15 ns or less	

周波数帯域はd.c.～30MHzであり、E/O変換器への最大入力電圧は±1Vである。したがって、例えば変成比100/1のCTの出力をさらに100/1の減衰器を通してこの光伝送系へ入力する測定系を構成すれば、10000Aまでの電流を測定することができる。CTと減衰器との組み合わせによって決まる減衰比を変化させることによって種々の大きさの電流の全体波形を測定することができる。一方、全体波形の他に零点近傍の電流波形の変化を測定する必要がある場合もある。後に紹介する、遮断器によるリアクトル電流遮断現象はその一例である[1)2)3)]。小さい電流値をS/N良く測定するためには、減衰比を小さくする必要がある。この場合、何も対策を施さないと零点近傍以外の電流値に対しては、E/O変換器への入力電圧が±1Vを超してしまい好ましくない。そこで、E/O変換器へ±1Vを超すレベルの電圧が入るのを防ぐ目的で、電圧制限回路をE/O変換器の入力端に取り付けた。以上に述べた、全電流波形測定系と零点近傍電流測定系の動作を、減衰器の減衰比が100/1の場合について図3.1に示す。

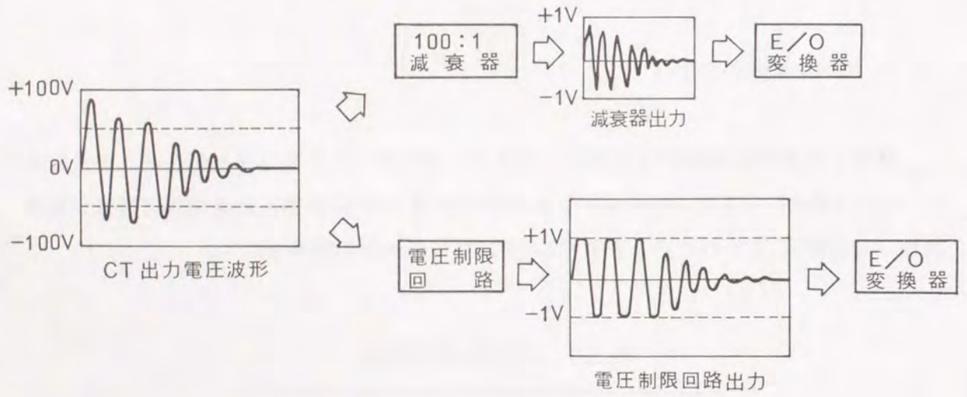


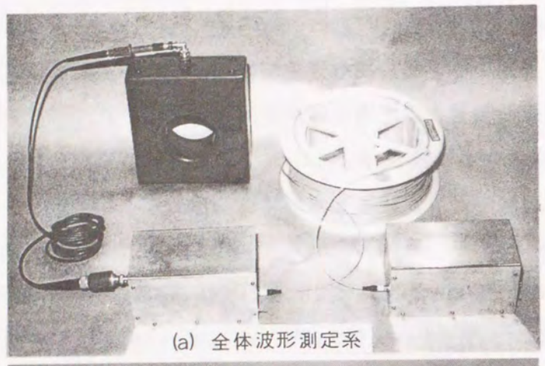
図 3.1 電流測定系の動作

図3.2に今回開発した高周波電流測定系を示す。減衰器としては100/1で帯域200MHzの高周波プローブを用いている。また電圧制限回路としてはスイッチングダイオードを逆並列に接続したクリッピング回路を用いた。ダイオードのスイッチング時間は２ns以下であり、100mAに対する制限電圧は0.7Vである。ダイオードが動作したときに流れる電流を制限してダイオードを保護するため、CTの出力端子とスイッチングダイオードとの間に100Ωの抵抗を直列に挿入した。E/O変換器の入力インピーダンスは1MΩであるため、ダイオードが動作しない状態での100Ωの抵抗の測定への影響は無視できる。この電圧制限回路を用いた測定系の精度を確認するため、図3.3に示す回路を用いて実験を行った。充電したコンデンサCをスイッチを閉じることによって短いリード線を通して放電させた。この実験においては、接地電位部にCTを取り付けることができるため、CTの出力を直接に測定することができる。そこで、放電電流を次の２つの測定系を用いて測定して結果を比較した。

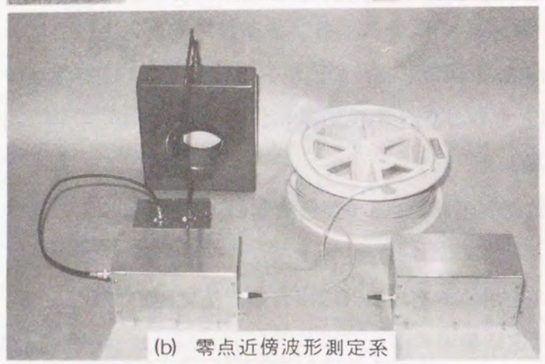
(1) 高周波CT、電圧制限回路、E/O変変換器およびO/E変換器と光ケーブルとからなる測定系。

(2) 同軸ケーブルを用いて高周波CTの出力を直接に測定する測定系。

図3.4(a)、(b)に測定結果の一例を示す。図3.4の波形は、放電電流が終了する部分の電流波形を示している。図3.4(a)は(1)の測定系での測定波形を示す。電流波形は70A程度で制限されているのが分かる。図3.4(a)の電流波形の70A以下の部分は、図3.4(b)に示す(2)の測定系で測定した波形と良く一致している。これは、光伝送系や電圧制限回路が、測定結果に影響を与えないことを示している。電圧制限回路の代わりに100/1の減衰器を取り付けて、電流波形全体が測定できる測定系とし、図3.3の回路を用いて電流を測定した。結果の一例を図3.5に示す。この場合の電流の振動周波数は750kHzである。CTの出力を直接に測定した図3.5(a)の波形と、今回開発した測定系の出力波形である図3.5(b)とは良く一致している。周波数を1MHzから50Hzまで変化させて同様の実験を行い、いずれの周波数においても、開発した測定系に問題がないことを確認した。また、電流値は、2Aと小さいが、立ち上がり時間が15nsのステップ波電流を用いた測定も実施し、開発した測定系を用いて15nsの立ち上がり時間の波形を測定できることも確認した。

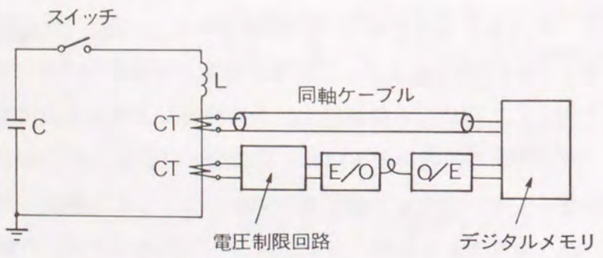


(a) 全体波形測定系



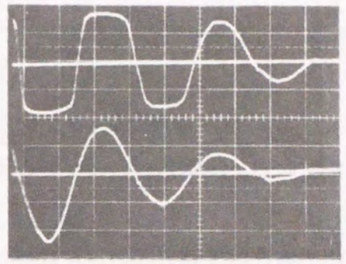
(b) 零点近傍波形測定系

図 3.2　高周波電流測定系



C　：充電したコンデンサ
L　：回路のインダクタンス
CT：高周波CT

図 3.3　電流測定系試験回路

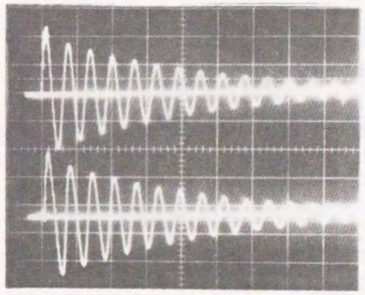


(a) CT，電圧制限回路，光伝送系からなる測定系の出力
縦軸：80 A／div
横軸：2 μs／div

(b) CTと同軸ケーブルから成る測定系の出力
縦軸：200 A／div
横軸：2 μs／div

図 3.4　測定電流波形

(a) CT，電圧制限回路，E／O変換器
(b) CTの出力直接



(a) CTと同軸ケーブルから成る測定系の出力
縦軸：800 A／div
横軸：2 μs／div

(b) CT，減衰器，光伝送系からなる測定系の出力
縦軸：800A／div
横軸：2 μs／div

図 3.5　測定電流波形

(a) CTの出力直接
(b) CT，減衰器，E／O変換器

3.3　高電圧回路の高周波電圧の測定法

GISの高電圧導体に発生する高周波サージを測定する方法の一つに、絶縁スペーサに埋めこまれたリング状のフローティング電極を利用する方法がある[4]。埋め込み電極と高電圧導体との間の漂遊静電容量と、埋め込み電極とGISタンクとの間に付加した静電容量とで容量分圧器を構成する方法である。測定系へのノイズの影響を避けるためには、この容量分圧器の出力はE/O変換して伝送するべきである。図3.6に高電圧回路の高周波電圧測定系の概念図を示す。この高周波電圧測定系の周波数特性は、光伝送系の周波数特性と、容量分圧器の周波数特性とから決まる。図3.7にスペーサ埋め込み電極に、電位引出のためのリード線のインダクタンスL_1と分圧のための静電容量C_dからなるインピーダンスZを接続した状態の概念図を示す。埋め込み電極に沿って、静電容量C_dを接続した点を原点とするx座標を考える。このとき、埋め込み電極上の電圧を$v(x)$、電流を$i(x)$とすると、次の方程式が成り立つ。

$$\frac{dv(x)}{dx} = -j\omega\frac{L_0}{2\pi r}i(x) \quad \cdots (3.1)$$

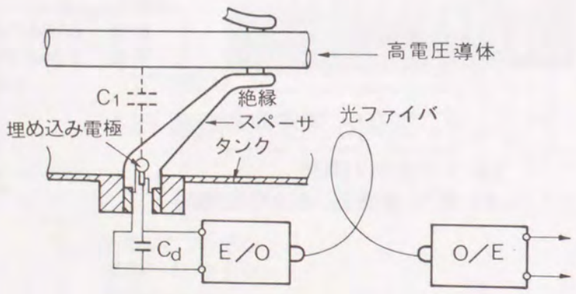
$$\frac{di(x)}{dx} = j\omega\frac{C_1}{2\pi r}(V - v(x)) - j\omega\frac{C_2}{2\pi r}v(x) \quad \cdots (3.2)$$

L_0:埋め込み電極のx方向単位長当たりのインダクタンス

C_1:x方向単位長の埋め込み電極と高電圧電極との間の静電容量

C_2:x方向単位長の埋め込み電極とタンクとの間の静電容量

V:高電圧導体の電圧



C_1：高電圧導体と埋め込み電極との間の静電容量
C_d：分圧のための付加静電容量

図 3.6　高電圧回路の高周波電圧測定系

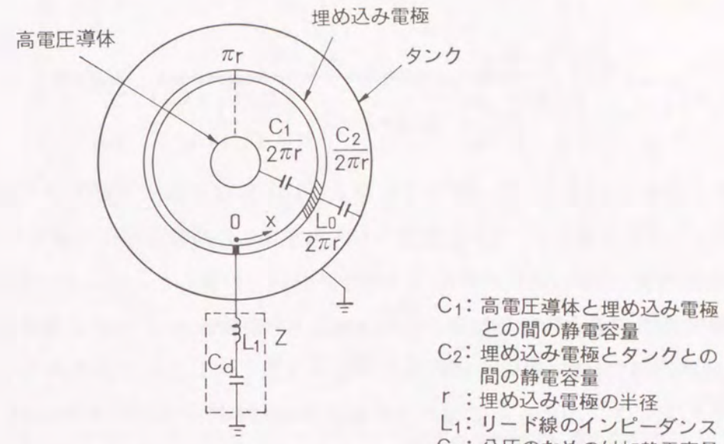


図 3.7　分圧のために埋め込み電極に静電容量を取り付けた構成の概念図

x=0において$2i(0)+v(0)/Z=0$であることと、$v(x)$がx=πrにおいて1次連続であることを考慮すると、(1)式および(2)式から$v(x)$は次の様に表される。

$$v(x) = \frac{C_1}{C_1+C_2}V + \frac{2\pi r\lambda}{j\omega(C_1+C_2)}V\left\{K_1\sin\lambda x - K_2\cos\lambda x\right\} \quad \cdots (3.3)$$

ただし、$\lambda = \frac{\omega}{2\pi r}\sqrt{L_0(C_1+C_2)}$

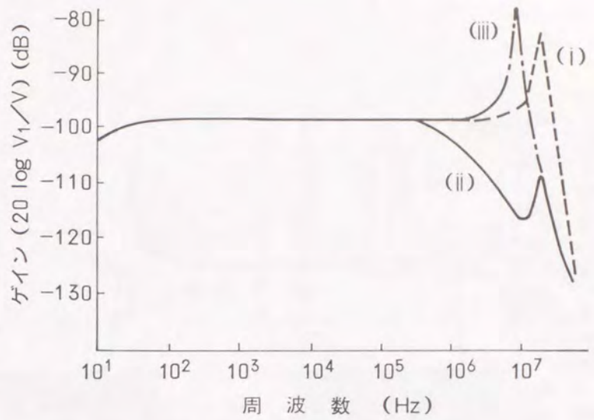
$$K_1 = \frac{-\frac{C_1}{C_1+C_2}\tan\lambda\pi r}{2Z\tan\lambda\pi r + \frac{2\lambda\pi r}{j\omega(C_1+C_2)}}V$$

$$K_2 = \frac{\frac{C_1}{C_1+C_2}}{2Z\tan\lambda\pi r + \frac{2\lambda\pi r}{j\omega(C_1+C_2)}}V$$

(3.3)式から、x=0における次式が得られる。

$$\frac{v(0)}{V}=\frac{C_1}{C_1+C_2}+j\frac{\sqrt{L_0(C_1+C_2)}}{C_1+C_2}\times\frac{\dfrac{C_1}{C_1+C_2}}{2Z\tan\lambda\pi r-j\dfrac{\sqrt{L_0(C_1+C_2)}}{C_1+C_2}}\quad\cdots(3.4)$$

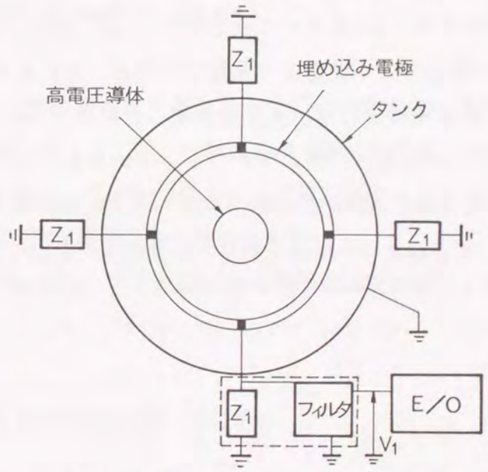
v(0)を，直列接続した高インピーダンスZ_aおよびZ_bからなる分圧回路でさらに分圧してE/O変換器へ入力する場合の、E/O変換器への入力電圧V_1の高電圧導体の電圧Vに対する利得の周波数特性を、550kVの代表的なスペーサについて計算した。インピーダンスZ_aおよびZ_bが純粋な抵抗の場合の計算結果の一例を図3.8中の曲線(i)に示す。埋め込み電極を含む分圧回路内部で10MHz程度の周波数で共振が発生していることがわかる。この共振の原因の一つとして、埋め込み電極内部の電位分布の不均一性が考えられる。インピーダンスZ_aおよびZ_bに1MHzの周波数フィルタを組み合わせて分圧器の出力電圧の共振を抑制した場合の計算結果を図3.8中の曲線(ii)に示す。共振が抑制されていることがわかる。この周波数は、光伝送系の周波数帯域よりも１桁小さい周波数であり、光伝送系の特性を有効に利用できていない。リード線のインダクタンスL_1を1μHに増やして同様に計算した結果を図3.8中の曲線(iii)に示す。L_1が大きくなると共振周波数が5MHz程度に低くなり同時に10MHzを超す周波数帯域での利得が大幅に減少することが分かる。これは、リード線のインダクタンスL_1が1μH程度に大きいと、光伝送系の周波数特性よりも１桁低い周波数帯域でしか測定できないことを示している。これらの結果から、埋め込み電極を利用した分圧器の周波数特性を改善するためには、L_1を最小にできる構成にし、埋め込み電極内部での電位分布を一様に近づける必要があることがわかる。これを可能にするための構造として、図3.9に示す様に分圧のための静電容量を4等配して埋め込み電極に直接取り付ける構成を考案した[1]。４等配した静電容量の一つからの出力をフィルタ回路を通してE/O変換器へ入力できる構成である。図3.10中の曲線(i)は、フィルタ回路がない場合の、E/O変換器への入力V_1の高電圧導体の電圧Vに対する利得の周波数特性を示す。共振周波数が50MHz程度に高くなっているのが分かる。図3.10中の曲線(ii)は、静電容量を４等配し、20MHzのローパスフィルタ回路を取り付けた場合のV_1の利得の周波数特性を示す。20MHz程度までの高周波サージを測定することができることが分かる。



(i) 抵抗分圧器のみの出力
(ii) 抵抗分圧器に1MHzのローパスフィルタを組み合わせた場合の出力
(iii) 抵抗分圧器までのリード線のインダクタンスを1μHに増やした場合の出力

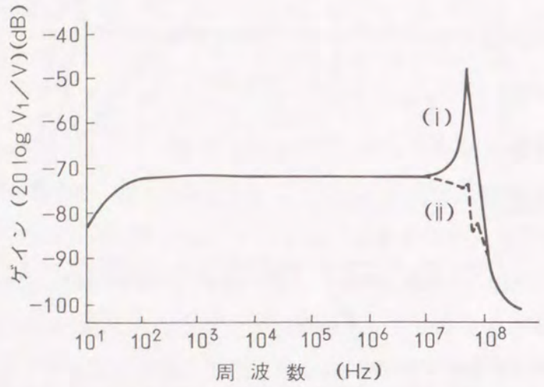
V ：高電圧導体の電圧
V_1：光変換器への入力電圧

図 3.8 高周波電圧測定系の周波数特性の計算例
（抵抗分圧器を組み合わせた場合）



Z_1 ：分圧のための静電容量のインピーダンス
V_1 ：光変換器への入力電圧

図 3.9 静電容量を４等配した構成の概念図

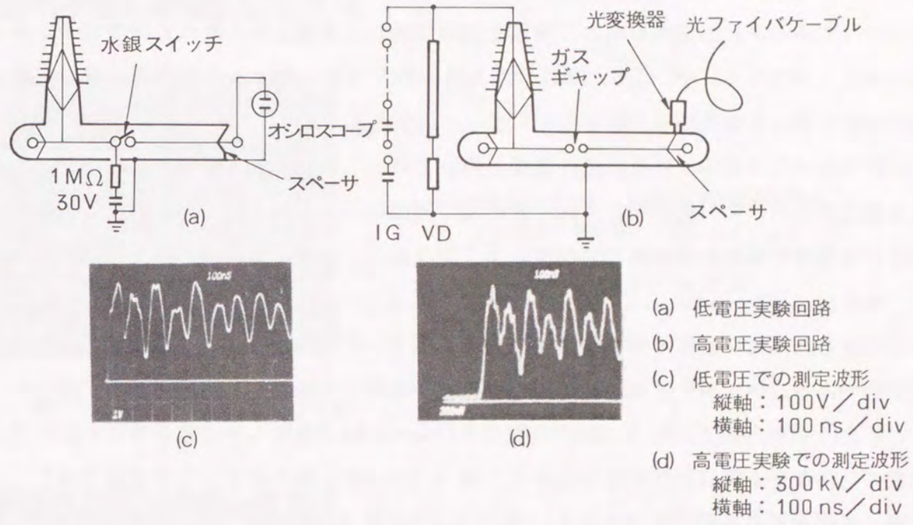


(i) 光変換器の前にローパスフィルタが無い場合
(ii) 光変換器の前にローパスフィルタが有る場合

V ：高電圧導体の電圧
V_1：光変換器への入力電圧

図 3.10 静電容量を 4 等配した構成の
周波数特性の計算結果

この測定系の有効性を実際のGISを用いて検証した。図3.11(a)に示す様に、2つに分割されたGISの高電圧回路の一方を低電圧で充電しておき、水銀スイッチで他方の回路と短絡した。この時、高電圧導体の電圧を直接測定した結果を図3.11(c)に示す。図3.11(b)に示す様にGISの2つの高電圧回路の間のギャップに高電圧を印加してフラッシオーバさせ、先に述べた高周波主回路電圧測定法を用いて高電圧導体の電圧を測定した結果を図3.11(d)に示す。両者は良く一致しており、本測定法の有効性が分かる。



(a) 低電圧実験回路
(b) 高電圧実験回路
(c) 低電圧での測定波形
縦軸：100V／div
横軸：100 ns／div
(d) 高電圧実験での測定波形
縦軸：300 kV／div
横軸：100 ns／div

図 3.11 低電圧実験と高電圧実験の波形の比較

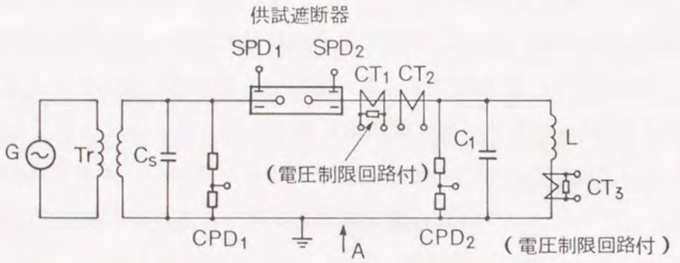
3.4 低電圧回路の高周波電圧の測定法

図3.2に示した電流波形測定系において、CTの代わりに抵抗分圧器を取り付けて、低圧回路の測定系を構成した。この測定系の周波数特性は、主に抵抗分圧器の周波数特性によって支配される。周波数特性の良い抵抗分圧器を用いることにより、光伝送系の周波数特性である30MHzまでの周波数帯域の測定を行うことができる。立ち上がり時間が15nsのステップ波を用いてこの電圧測定系の応答を調査し、本測定系を用いて電流測定系と同様にこの立ち上がり時間の電圧波形を測定できることも確認できた。

3.5 リアクトル電流遮断試験への適用例

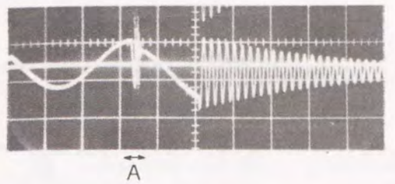
上述の高周波電流測定法と高周波主回路電圧高周波主回路電圧測定法を、275kV リアクトルに流れる電流をガス遮断器で遮断した場合に生じる再発弧現象および高周波消

弧現象の測定に応用した[1]。図 3.12 に実験回路を示す。高電圧導体に取り付けた CT_1 および CT_2 を用いて高電圧回路に流れる電流を測定した。CT_1 の出力端には電圧制限回路を取り付けてあり、光伝送系を用いて高電圧回路に流れる電流波形の零点近傍の様子を測定することができる。CT_2 の出力端には減衰器を取り付けてあり、光伝送系を用いて高電圧回路に流れる電流波形全体を測定することができる。高電圧回路の電圧の測定には、3.3 節で述べたスペーサの埋め込み電極を用いて構成した容量分圧器と光伝送系とからなる測定系を用いた。電圧測定系は、遮断器の両側のスペーサに取り付けた。ガス遮断器による再発弧現象と高周波消弧現象に伴う高周波サージ電圧と高周波電流の測定結果の一例を図 3.13(a), (b), (c), (d), (e)に示す。図 3.13(a)は遮断器を開放動作させたときに測定した高電圧回路の負荷側の電圧波形を示す。図 3.13(b)は図 3.13(a)のA部の拡大図である。開極中に遮断機の極間で再発弧や高周波消弧が生じて電圧波形が変化しているようすが分かる。図 3.13(c)は図 3.13(a)と同時に測定した高電圧導体を流れる電流の全体波形と零点近傍の波形を示す。図 3.13(c)の上側の波形が全体波形であり、下側の波形が零点近傍の波形である。図 3.13(d)は図 3.13(c)の下側の零点近傍波形のB部の拡大図である。図 3.13(e)は図 3.13(c)の下側の零点近傍波形のC部の拡大図である。高周波消弧現象にともなう 100A 以下の零点近傍の電流変化を精度良く観測できている。この様に 100A 以下の電流波形を精度良く測定できていることは、本方式が、耐ノイズ性の優れた方式であることを示している。

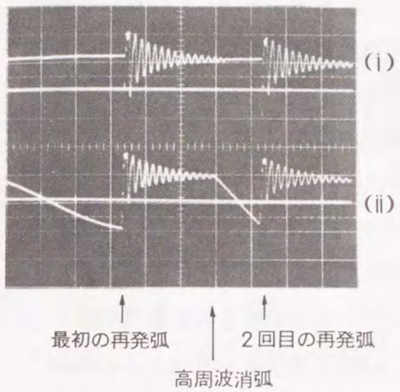


G ：短絡発電機　　C_s ：電源側静電容量
CT：変流器　　CPD：容量型分圧器
Tr ：変圧器　　L ：負荷リアクトル
SPD：スペーサに取付けた光変換分圧器　　C_1 ：負荷側静電容量

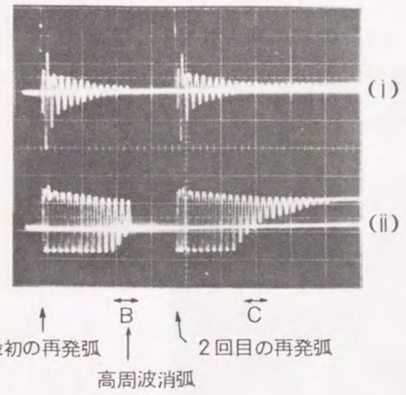
図 3.12　リアクトル遮断実験回路



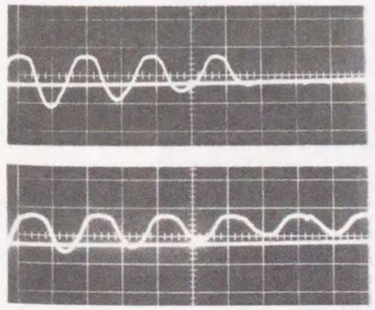
(a)　電圧波形（遮断器の負荷側電圧）



(b)　再発弧電圧波形（遮断器の負荷側電圧）
（(a)中のA部の拡大 100 μs／div）
（i）遮断器の電源側電圧
（ii）遮断器の負荷側電圧



(c)　再発弧高周波電流
（i）CT_2 を用いた全体電流波形　100A／div
（ii）CT_1 を用いた測定した零点近傍の電流波形



(d)　(c)の(i)の波形のB部の拡大波形
縦軸：100A／div
横軸：10 μs／div

(e)　(c)の(ii)の波形のC部の拡大波形
縦軸：100A／div
横軸：10 μs／div

図 3.13　測 定 波 形

（開発した測定系を用いたリアクトル電流遮断実験における再発弧高周波形の実測例）

3.6　550kVGIS の断路器サージ電圧測定への適用例

上述の高周波主回路電圧測定系を、550kVGISの断路器サージ測定に応用した[5]。図3.14に測定を実施した550kVGIS変電所を示す。図3.15は、測定を実施した回路の単線結線図を示す。Ａ点の断路器を動作させて、Ｂ点で商用周波数電圧波形を測定し、Ｃ点で高周波サージ波形を測定した。Ｂ点およびＣ点での測定いずれにも絶縁スペーサの埋め込み電極を利用した分圧器を用いた。Ｂ点の測定には周波数帯域が10Hz～100kHzの低い周波数特性の測定系を用いた。Ｃ点の測定には3.3節に述べた高周波電圧測定系を用いた。図3.16にＣ点においてスペーサに取り付けた測定器を示す。この測定器はE/O変換器と分圧用のコンデンサと分圧回路内での共振を抑えるためのフィルタ回路を内蔵している。図3.17(a)は断路器を開極動作させる際にＢ点で測定した商用周波数電圧波形の一例である。断路器の極間の再点弧現象に対応して、波形が階段状に変化している様子がわかる。図3.17(a)のＴ点で生じた再点弧によって生じた高周波サージを図3.15のＣ点で測定した結果を図3.17(b)に示す。基本周波数が３MHz程度の高周波サージ波形がノイズの影響なく観測できてきる。測定を実施した回路について、Ｃ点での高周波サージ波形を過渡回路現象解析プログラム(EMTP)を用いて解析した結果を図3.18に示す。図3.17(b)測定波形は、解析波形図3.18と電圧レベルの誤差１%以内で一致し、基本周波数成分も非常に良く一致した。

このれらの結果は、本測定系をMHzオーダの非常に周波数の高いサージを測定する実規模実験に適用できることを示している。

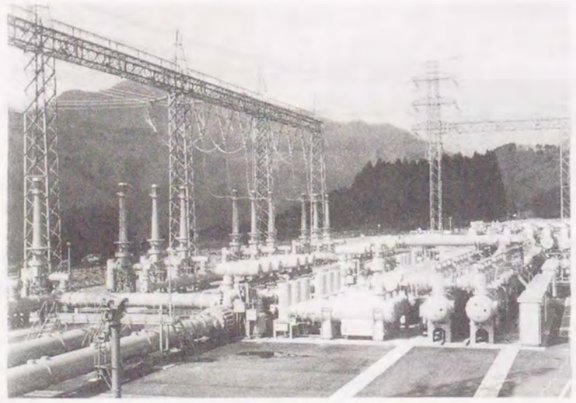
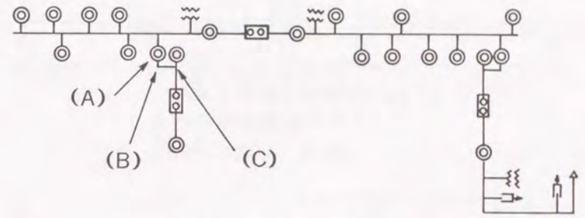


図3.14　550kV GIS 変電所



550kV GIS の単線結線図

(A) 操作 DS
(B) 商用周波電圧測定点
(C) 高周波サージ電圧測定点

図3.15　単線結線図

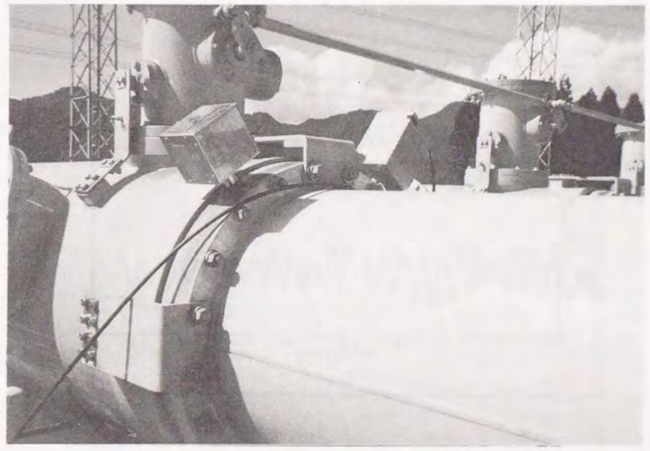
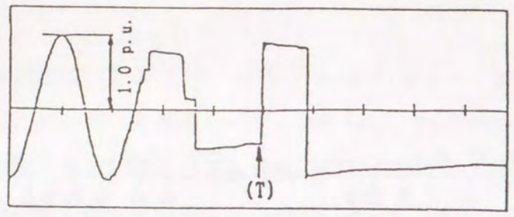
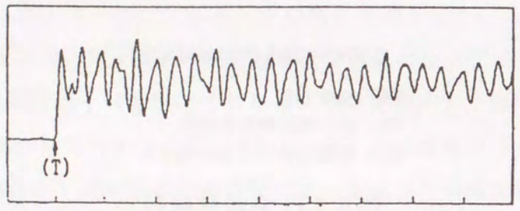


図3.16　高周波電圧測定器



(a) 商用周波数電圧波形
（断路器開極操作時）
横軸：10ms／div



(b) 高周波電圧波形
（(a)のT部の拡大）
横軸：1μs／div

図3.17 実測波形例

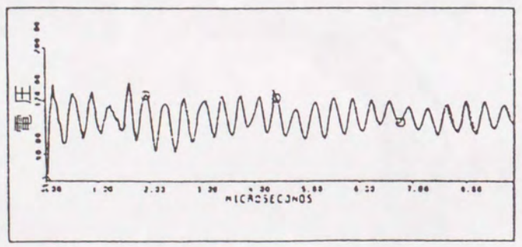


図3.18 EMTP解析波形

3.7 まとめ

本章では、高周波サージの測定上の問題点について述べ、電気信号／光信号変換測定系がGISの高周波サージ測定に有効であることを述べた。また、電気信号／光信号変換技術を応用して新しく開発した高周波電流測定系と高周波主回路電圧測定系、および低圧系サージ測定系の構成について述べた。これらの測定系の適用事例を紹介し、その有効性を示した。

1)K. Nojima, S. Nishiwaki, H. Ohkubo, S. Yanabu : “ Measurement of Surge Current and Voltage Waveforms using Optical Tranmission Techniques”, IEE Proc., Vol.134, Pt.C, No.6, p.p.415-422

2)E. Slamecka : “ Interruption of small inductive currents”, Electra, 72, p.p.73-103, 1980

3)M. Murano, S. Yanabu, H. Ohhashi, H. Ishizuka, T. Okazaki : “ Current Chopping Phenomena of Medium Voltage Circuit Breakers”, IEEE Trans., PAS-96, No.1, p.p.143-149, 1977

4)H. Murase, I. Ohshima, H. Aoyagi, I. Miwa : “Measurement of Transient Voltages Induced by Disconnect Switch Operation”, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-104, No.1, p.p.157-165, January 1985

5)K. Nojima, H. Aoyagi, H. Murase, I. Ohshima : “ Very Fast Transient Overvoltages in Gas Insulated Substation - Modeling of Three Phase Encapsulated Bus -”, ISH Yokohama, 33.02, p.p.323-326, August 1993

4.1　まえがき

2.2節でも述べたように、GISにおいて避雷器が動作すると、GISの回路に起因した数MHzの高周波数振動を含んだ高周波電流が接地メッシュへ流入して接地系に高周波サージが発生することが考えられる。この高周波サージの大きさや周波数についての実測データはほとんど報告されていない。そこでこれについての実測研究を行った。高周波振動を含んだ電流の立ち上がり時間は100ns程度と短い。したがって、避雷器が動作したときに接地系に発生する高周波サージ電圧を検討するためには、100ns程度の急峻な立ち上がり時間の電流波形を用いた実験を行う必要がある。この様な急峻な電流を用いた実験を建設途中の550kVGIS変電所で実施した[1)]。そして、接地系を構成する接地メッシュ単体のインピーダンスと、その上に設置されたGISタンクに発生する高周波サージ電圧とを実測した。本章では、この実験結果について述べる。

4.2　接地メッシュのインピーダンスの実測

4.2.1　接地系の構成

測定を行った550kVGIS変電所を図4.1に示す。このGIS変電所の接地系の構成の概念図を図4.2に示す。接地メッシュは、1mの深さに埋設された30m×30mの間隔の主メッシュと、50cmの深さに埋設された2m×2mの間隔の補助メッシュとからなっている。接地メッシュの商用周波数における接地抵抗は、事故電流19kAに対する接地電位上昇を2kV以下に抑えるため、0.1Ω以下になるように設計されている。接地メッシュを構成する導体は、100mm^{2}の銅線である。主メッシュは変電所全体に敷設されており、接地杭に接続されている。この変電所の土壌の抵抗率は300Ω・mである。補助メッシュは、GISのレイアウトに従って、GISの下にのみ敷設されている。GISは補助メッシュの上に敷設したコンクリート基礎の上に設置される。GISタンクや避雷器は補助メッシュから引き出した接地線に接続される。主メッシュや補助メッシュは、コンクリート基礎の鉄筋に商用周波数電流を流さないためにコンクリート基礎とは絶縁されている。

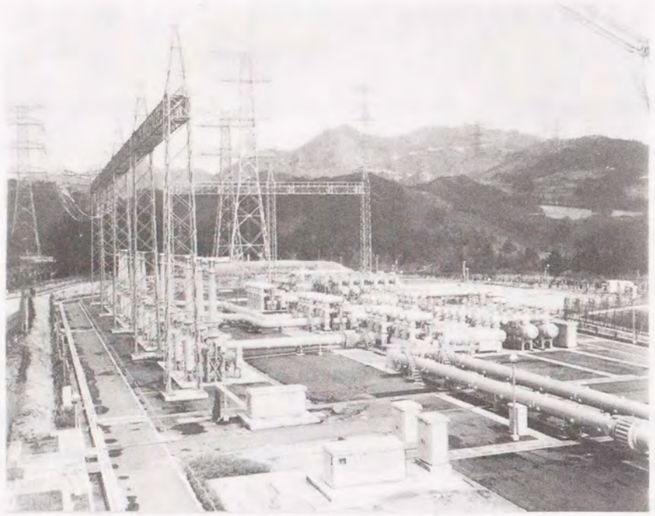


図 4.1　550 kV GIS 変電所

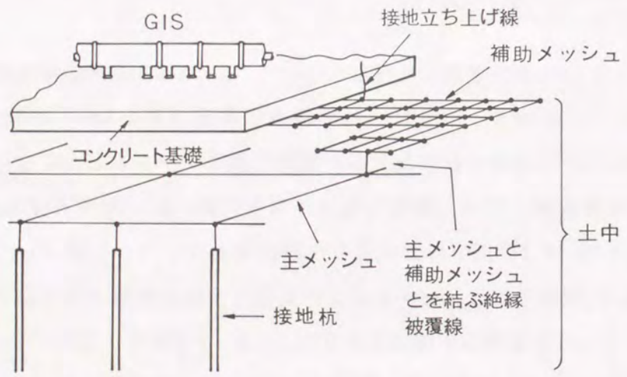
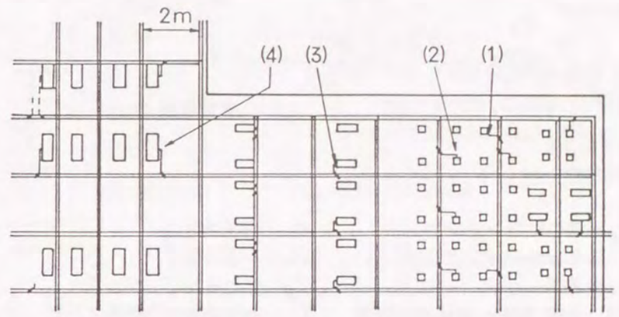


図 4.2　接地系の構成

図4.3は測定を行った場所周辺の補助メッシュの敷設状態を示す。電流を図4.3中の(1)点へ注入し、(1)、(2)、(3)および(4)の各点の補助メッシュの電位を測定した。(1)の点は、建設後実際に避雷器が接地される点に対応している。



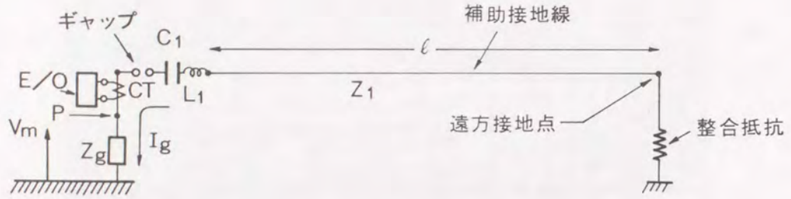
(1)　電流注入点
((1)(2)(3)(4)の各点の電位を測定した。)

図 4.3　補助接地メッシュの構成

4.2.2 急峻波電流の流入方法

図4.4は接地メッシュへ急峻ステップ波電流を流入させるための回路を示す[1)2)3)]。充電したコンデンサC_1の一端に取り付けたギャップを接地メッシュへ放電させることによって、接地メッシュに急峻波電流I_gを流入させた。コンデンサの他端は、電流波形を調整するために取り付けたインダクタンスL_1を通して長尺の補助接地線につないだ。長尺の補助接地線の他端は、GIS変電所の敷地の外に打ち込んだ接地杭に、整合抵抗R_mを介して接続した。この補助接地線をの特性インピーダンスをZ_1とし、接地メッシュのインピーダンスをZ_gとすると、急峻ステップ波電流の立ち上がり時間は、時定数$2L_1/(Z_1+Z_g)$で決まる立ち上がり時間となる。また、コンデンサの充電電圧がV_0の時、補助接地線へ流入するステップ波電流の値は$V_0/(Z_g+Z_1)$となる。補助接地線として用いるため、地上1.5mの高さに5.5mm^{2}の被覆線を160m敷設した。事前に、この補助接地線の伝搬特性を測定した結果、特性インピーダンスは約300Ωであり、伝搬時間は0.54μsであった。この

補助接地線を用いることによって、往復伝搬時間0.54×2=1.08μsの間は、変電所敷地外部の接地端からの影響の無いステップ波電流を接地メッシュへ流入させることができる。



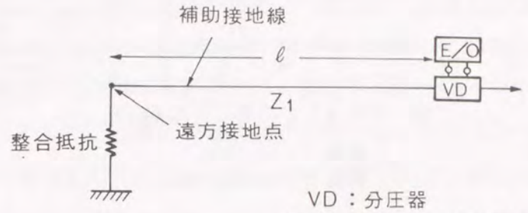
C1：充電したコンデンサ
L1：波形調整用インダクタンス
CT：変流器
E/O：電気信号／光信号変換器
P：電圧測定点
Vm：P点の電圧
Zg：接地インピーダンス
Z1：補助接地線の特性インピーダンス
ℓ：補助接地線の長さ

図4.4　電流流入回路

4.2.3　測定方法

接地メッシュへの流入電流の測定には3章で述べた電流測定系を用いた。貫通型高周波変流器(CT)の出力を光信号へ変換して観測室へ伝送した。

図4.5は接地メッシュの過渡電圧を測定するための回路を示す[1)2)3)]。入力インピーダンスが50kΩの分圧機の入力端を測定点に接続した。分圧器の接地端子は電流流入回路と同様に長尺の補助接地線を介して変電所の敷地外に接地した。補助接地線の特性インピーダンスは300Ωであり、分圧器の入力インピーダンス50kΩのわずか0.6%であることから、分圧器の入力端子と接地端子との間の電圧は、接地メッシュの電位とみなしてよいものと考えられる。電流流入のための補助接地線と電位測定のための補助接地線とのあいだの電磁気的結合は、測定誤差の原因となる。この電磁気的結合を防ぐため、これら2つの補助接地線は、可能な限り互いに180°の配置になるように敷設した。このため、補助接地線はほぼ変電所全体を横切るルートで敷設した。これは、この変電所が建設途中であったために可能であった。分圧器の出力も光信号に変換して観測室へ伝送した。



VD：分圧器
E/O：電気信号／光信号変換器
Z1：補助接地線の特性インピーダンス
ℓ：補助接地線の長さ

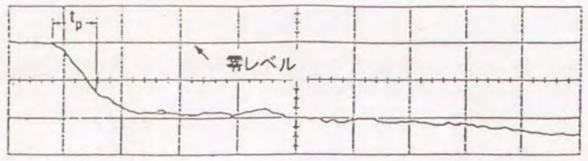
図4.5　メッシュ電位測定回路

4.2.4　測定結果

図4.6(a)に、接地メッシュへの流入電流I_gの実測例を示す。接地メッシュへの流入電流は、立ち上がり時間が100ns程度のステップ波とみなせることがわかる。図4.6(b)は電流流入点で測定した接地メッシュ電位V_mの測定例を示す。V_mはdI_g/dtが最大となる時刻tpにピーク値V_{mp}を示している。これは、接地メッシュの過渡インピーダンスZ_gがインダクタンス成分を含んでおり、V_{mp}が主にこのインダクタンス成分によって生じていることを示している。

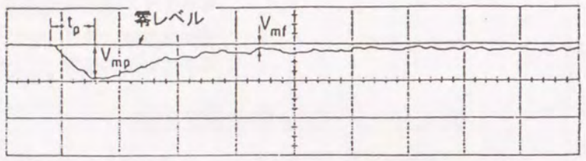
図4.6(b)から、接地メッシュの電位はI_gがほぼフラットになってからも電圧V_{mf}を示すことがわかる。これは、接地メッシュの過渡インピーダンスが抵抗成分も含んでいることを示している。

図4.7は、立ち上がり時間が100nsで電流値が約80Aのステップ波電流を図4.3の(1)の点へ流入させた時の(1),(2),(3)および(4)の点での発生電圧のピーク値を示す。図4.7から明らかな様に、メッシュの電位は電流流入点の近傍でのみ大きく上昇しており、電流流入点から離れるにしたがって急激に減少している。電流流入点から1.5m離れると、発生電圧は電流流入点の電圧の10%程度に減少しており、接地メッシュの電位上昇はほぼ無視できる。これは、Gupta等によって報告されている様に[4)5)]、埋設接地メッシュに急峻な電流を流入させた場合、電圧の上昇する領域は電流流入点近傍のみで



(a) 電流注入点の電流波形 (I_g)

縦軸：40A／div
横軸：100ns／div

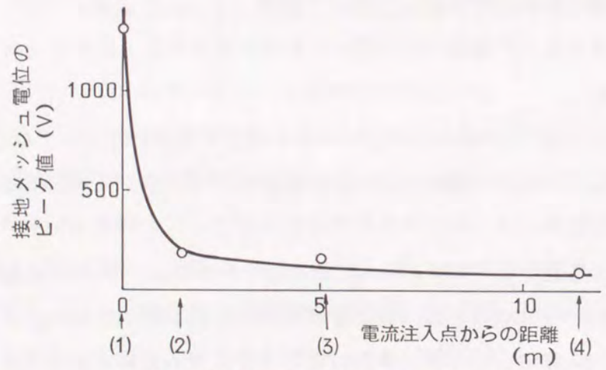


(b) 電流注入点の電位 (V_m)

縦軸：1,000V／div
横軸：100ns／div

V_{mp}：接地メッシュ電位のピーク値
t_p ：接地メッシュ電位のピーク発生時刻
V_{mf}：注入電流がフラットな時刻の電圧

図4.6 実 測 波 形



((1), (2), (3), (4)は図4.3の測定点に対応する)

図4.7 メッシュ電位の分布

シュに急峻な電流を流入させた場合、電圧の上昇する領域は電流流入点近傍のみである

に接地メッシュを構成する導体が持つインダクタンス成分に起因しているものと考えられる[6)7)]。接地メッシュの電位上昇領域は、土壌の固有抵抗や接地メッシュの構成および土壌の電離によって影響を受けることが考えられる。避雷器の放電電流が接地メッシュへ流入した場合でも土壌の電離は小さく接地メッシュのインピーダンスへの変化は小さいとの報告もある[4)]。土壌の電離は電位上昇を低下させる効果を持つことから、今回の 100A 程度の電流を用いた測定結果による接地メッシュ電位の評価は、実用上は過酷側の評価になるものと考えられる。従来より接地メッシュの過渡インピーダンス特性を定式化する試みが行われている[8)9)10)]。しかし、実際の設備において接地メッシュの構成や土壌の固有抵抗を考慮して電位上昇を定式化するのは難しい。今回測定を行った接地メッシュの構成は GIS 変電所における標準的な構成であり、また土壌の抵抗率も標準的なものである。今後、種々の GIS 変電所での測定を積み重ねてゆくことによって、より一般的な評価ができるものと考えられが、ここで得られた測定結果はほぼ標準的な接地メッシュの過渡応答を示しているものと考えられる。

4.2.5 等価インピーダンス

一般に、抵抗率が数100Ω・m以下の土壌に埋設したメッシュのインピーダンスは、その容量成分を無視して接地インピーダンス評価しても大きな誤差を生じないと言われている[6)]。この場合には、接地メッシュ上の１点からみた接地メッシュの巨視的な等価回路は抵抗Rとインダクタンスｌとの直列回路で現される。この等価回路を用いると、電流流入点における接地メッシュ上の点の電位Vmは次の様に表される。

$$Vm = L \cdot dI_g / dt + R \cdot I_g \quad (4.1)$$

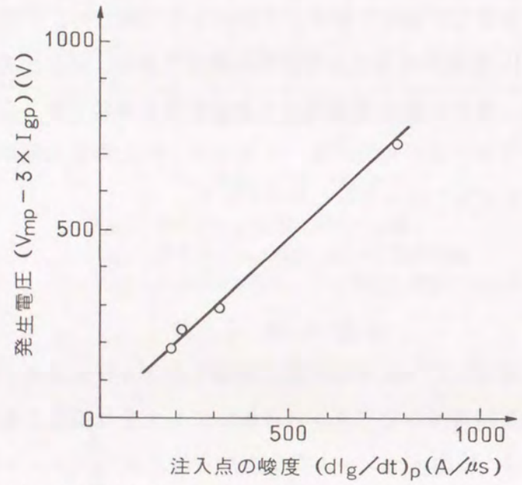
ただし、I_gは流入電流

流入電流の時間変化が小さくてインダクタンス成分による寄与が無視できる場合には$V_m = R \cdot I_g$となる。図4.6(a)の電流波形のフラットな部分の平均値は70Aとなる。図4.6(b)から、電流がフラットな時刻のV_mは210Vである。これらの結果から、R＝210／70＝3Ωという値が得られる。さらに、電流流入点の接地メッシュの電位がピーク値V_{mp}となる時刻の電流値をI_{gp}とし、この時刻の電流の峻度を$(dI_g/dt)_p$とすると、

$$V_{mp} - R \cdot I_{gp} = L \cdot (dI_g / dt)_p \quad (4.2)$$

という関係が成り立つ。Ｌを評価するため、$(dI_g/dt)_p$を変化させてV_mの測定を行った。

この測定結果をもとにして、R=3Ωとして算出した$(V_{mp}-R\cdot I_{gp})$と$(dI_g/dt)_p$との関係を図4.8に示す。$(V_{mp}-R\cdot I_{gp})$は$(dI_g/dt)_p$にほぼ比例しており、インダクタンスの値はほぼ一定とみなせることがわかる。図4.8の傾きからLは1μHと見積もられる。これらの値から、接地メッシュ上の一点からみた接地メッシュの巨視的なインピーダンスは図4.9の様に表される。



V_{mp}：接地メッシュ電位のピーク値
I_{gp}：接地メッシュ電位がピークとなる時刻における注入電流値
I_g：注入電流
(dI_g/dt)：接地メッシュ電位がピークになる時刻における注入電流の峻度

図4.8　電流峻度とインダクタンス成分によって発生する電圧

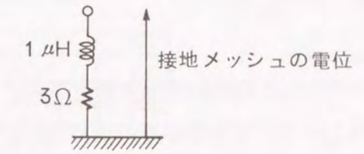
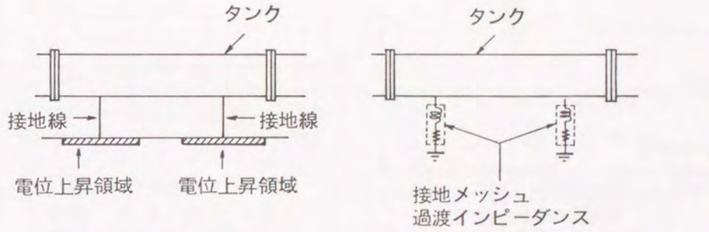


図4.9　接地メッシュのインピーダンス

4.2.4節で述べた様に、接地線を通して高周波電流が接地メッシュに流入したときの接地メッシュの電位の上昇範囲は1.5m程度以内と非常に狭い。このことは、図4.10(a)に示すように、高周波サージに対しては、それぞれの接地線が接続されるメッシュ上の点の周囲のメッシュの電位上昇領域の重なりは無視できることを示している。このことから、今回得られた等価インピーダンスをGISタンクに発生する高周波電圧の解析に応用する場合には、図4.10(b)に示すように、GISタンクの各接地点にこの等価インピーダンスを接続すれば良いものと考えられる。

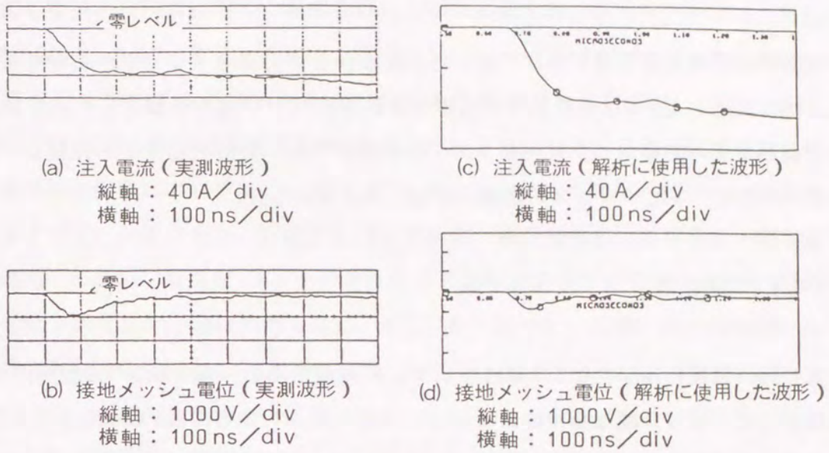


(a) 電位上昇領域　　(b) 接地メッシュ過渡インピーダンスの適用

図4.10　高周波サージに対する接地状態の模擬

4.2.6　解析波形との比較・検討

図4.9の等価回路の上端の電圧V_mを過渡回路現象解析プログラムEMTPを用いて解析した。図4.11(a)はメッシュへ流入させた立ち上がり時間が100nsの電流の実測波形を示す。図4.11(b)は電流流入点の電圧の測定波形を示す。図4.11(c)は解析に用いた図4.11(a)の実測波形の模擬波形を示す。図4.11(d)は図4.10(c)に対するV_mの解析結果を示す。実測のV_mと解析のV_mとは良く一致している。立ち上がり時間が2μsの電流に対しても同様に解析した。図4.12(a)はメッシュへ流入させた立ち上がり時間が2μsの電流の実測波形を示す。図4.12(b)は図4.12(a)の電流の流入点の電圧の測定結果を示す。図4.12(c)は解析に用いた、図4.12(a)の実測波形の模擬波形を示す。図4.12(d)は図4.12(c)に対するV_mの解析結果を示す。実測のV_mと解析のV_mはやはり良く一致した。これらの結果は、今回得られた等価インピーダンスが100nsから2μsまでの立ち上がり時間の電流に対して適用できることを示している。



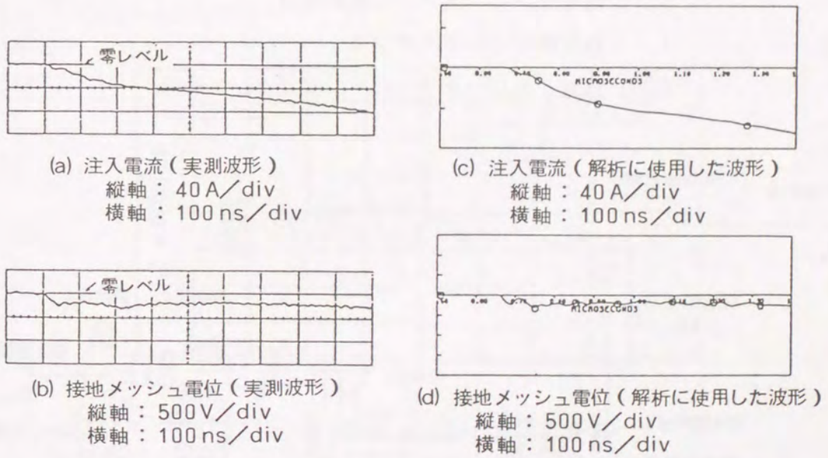
(a) 注入電流（実測波形）
縦軸：40A／div
横軸：100ns／div

(c) 注入電流（解析に使用した波形）
縦軸：40A／div
横軸：100ns／div

(b) 接地メッシュ電位（実測波形）
縦軸：1000V／div
横軸：100ns／div

(d) 接地メッシュ電位（解析に使用した波形）
縦軸：1000V／div
横軸：100ns／div

図4.11　メッシュ電位の実測波形と解析波形との比較
（流入電流の立ち上がり時間：100ns）



(a) 注入電流（実測波形）
縦軸：40A／div
横軸：100ns／div

(c) 注入電流（解析に使用した波形）
縦軸：40A／div
横軸：100ns／div

(b) 接地メッシュ電位（実測波形）
縦軸：500V／div
横軸：100ns／div

(d) 接地メッシュ電位（解析に使用した波形）
縦軸：500V／div
横軸：100ns／div

図4.12　メッシュ電位の実測波形と解析波形との比較
（流入電流の立ち上がり時間：2μs）

4.3 GISタンクに発生する高周波サージ電圧

550kVGISに模擬避雷器を取り付け、これを動作させて接地メッシュへ急峻波電流を流入させた。そして、GISのタンクに発生する高周波サージ電圧を測定した。この測定結果と前節で求めた接地インピーダンスの等価回路を用いた解析結果とを比較し、前節で得られた接地インピーダンスの解析への適用性を検討した。

4.3.1 実験方法

図4.13に実験に用いたGISの構成を示す。模擬避雷器の一端をGISの接地開閉器1の接地端子に取り付け、他端を接地メッシュに接続した。接地開閉器1の接地端子とGISタンクとを短絡接続していた導体は取り外しておいた。接地抵抗を4.2.6節で示したのと同様に抵抗とインダクタンスとで表わすと、避雷器の端子電圧V_{arr}は

$$V_{arr} = (R_{arr} + R_g)\cdot i + (L_l + L_g)\cdot \frac{di}{dt} \qquad (4.3)$$

ただし、R_{arr}：避雷器の残留抵抗

R_g　：接地インピーダンスの抵抗成分

L_l　：接地線のインダクタンス

L_g　：接地インピーダンスのインダクタンス成分

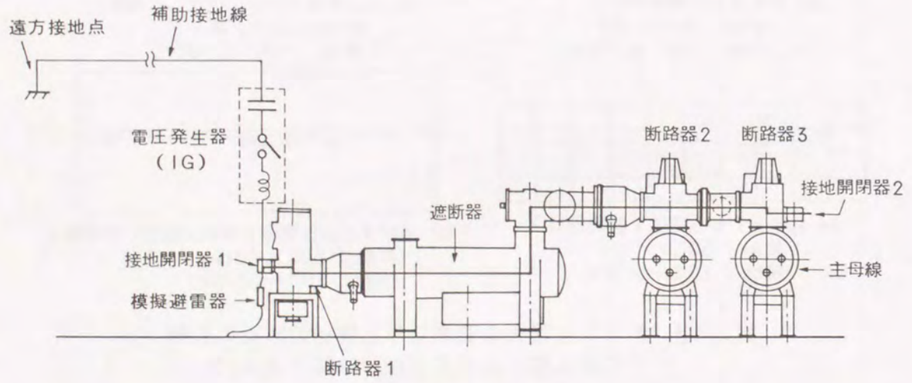


図4.13　GISの構成

と表わされる。従って、放電電流を1/1000にし、di／dtも1/1000にすれば、避雷器の端子電圧も定格の1/1000になり、実規模の1/1000の模擬実験を行える。1/1000の電流に対してdi／dtを1/1000にするためには、模擬避雷器の放電電流の立ち上がり時間は実際の放電電流と同じにする必要がある。これらの条件を満たすために、実際の避雷器の1/1000のV-i特性を持つ非直線抵抗体(商品名TNR)を使用した。模擬避雷器を取り付けたのと同じ接地装置ESの端子にインパルス電圧発生器(IG)から電圧を印加し、模擬避雷器を動作させて、接地メッシュに電流を流入させた。模擬避雷器の放電電流、模擬避雷器の接地端子の電位、断路器1タンクの電位、ガス遮断器タンクの電位、接地開閉器2のタンク電位を測定した。電位の測定には、4.2.3節で述べた、長尺の補助接地線を用いた接地電位測定系を用いた。

4.3.2 測定結果

IGから立ち上がり時間1μs程度の電圧を印加して模擬避雷器を動作させたときの、避雷器の放電電流波形を図 4.14 に示す。模擬避雷器の流入電流のピーク値は 9.8A であった。立ち上がり時間は 250ns である。

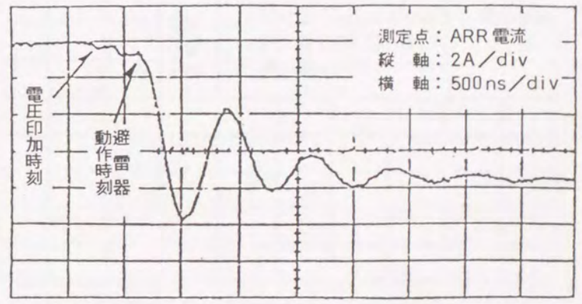
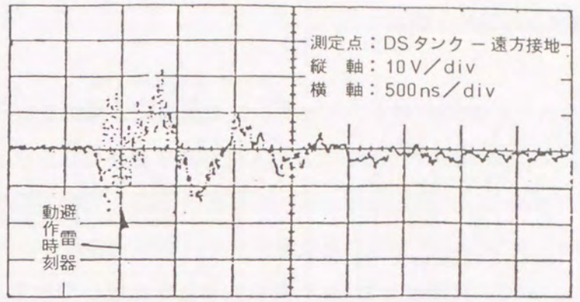
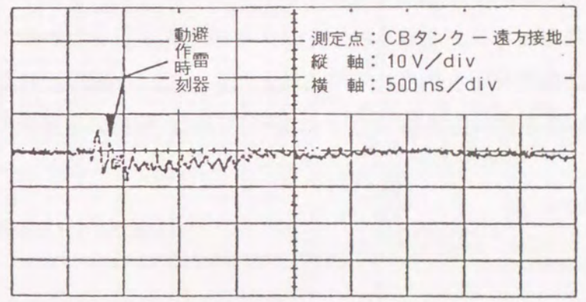


図4.14　模擬避雷器の放電電流

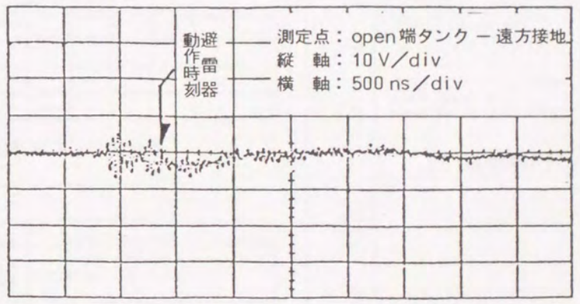
この時の GIS タンク各部の電圧測定結果を図 4.15(1),(2),(3)に示す。GIS のタンク各部には数 MHz の基本周波数で継続時間が 5 μ s 程度の高周波電圧が観測された。電流流入点に最も近く 0.5m 程度の距離にある断路器 1 のタンクの電位が最も大きく約 20V であった。断路器 1 の電位を、流入電流値が避雷器の定格電流値である 10 k A の場合に換算すると約 20kV となる。避雷器の動作時にはこの GIS タンクには、周波数 1.2MHz の電圧が最大 20kV 程度発生するものと考えられる。電流流入点から 4m の距離である遮断器タンクの電位のピーク値は、約 8V であり、断路器 1 のタンクの電位の 40%であった。メッシュへの流入電流値を避雷器の定各放電電流である 10A に換算した場合、遮断器のタンク電位は約 8kV となる。GIS タンクの電位は、図 4.7 に示した接地メッシュの電位の分布と同様に、電流流入点からの距離とともに急激に減衰した。変電所全体で見た場合、避雷器の設置場所は限定されるので、避雷器の放電電流による誘導障害の発生場所も限定されるものと考えられる。



(1) 断路器 1 タンクの電位



(2) 遮断器タンクの電位



(3) 接地開閉器 2 タンクの電位

図 4.15　GIS タンク各部の電位

4.3.3　解析波形との比較・検討

4.2.5 節で得られた、等価接地インピーダンスを用いて、解析を行った。解析には過渡回路現象解析プログラム EMTP を用いた。GIS は高電圧導体とタンクシースとからなる 2 導体線路として模擬し、回路定数は EMTP に付属の CABLE CONSTANTS プログラムを用いて算出した。GIS タンクは各接地点を接地メッシュの等価接地インピーダンスを介して接地した。図 4.16 に、実測波形と EMTP 解析波形とを比較して示す。解析波形は実測波形よりもピーク値が 40%程度高めになっているが、基本的な波形は良く一致しいる。この誤差の原因としては、EMTP 解析において隣の相の GIS タンクや支持架構などを考慮していないことが考えられる。今後、GIS タンクと接地メッシュとからなる伝送線路の伝搬特性や架構等の影響を明らかにしてゆくことによって、今回得られた接地メッシュの等価インピーダンスを用いた GIS タンクの電位の EMTP 解析の精度を向上してゆけるものと考えられる。

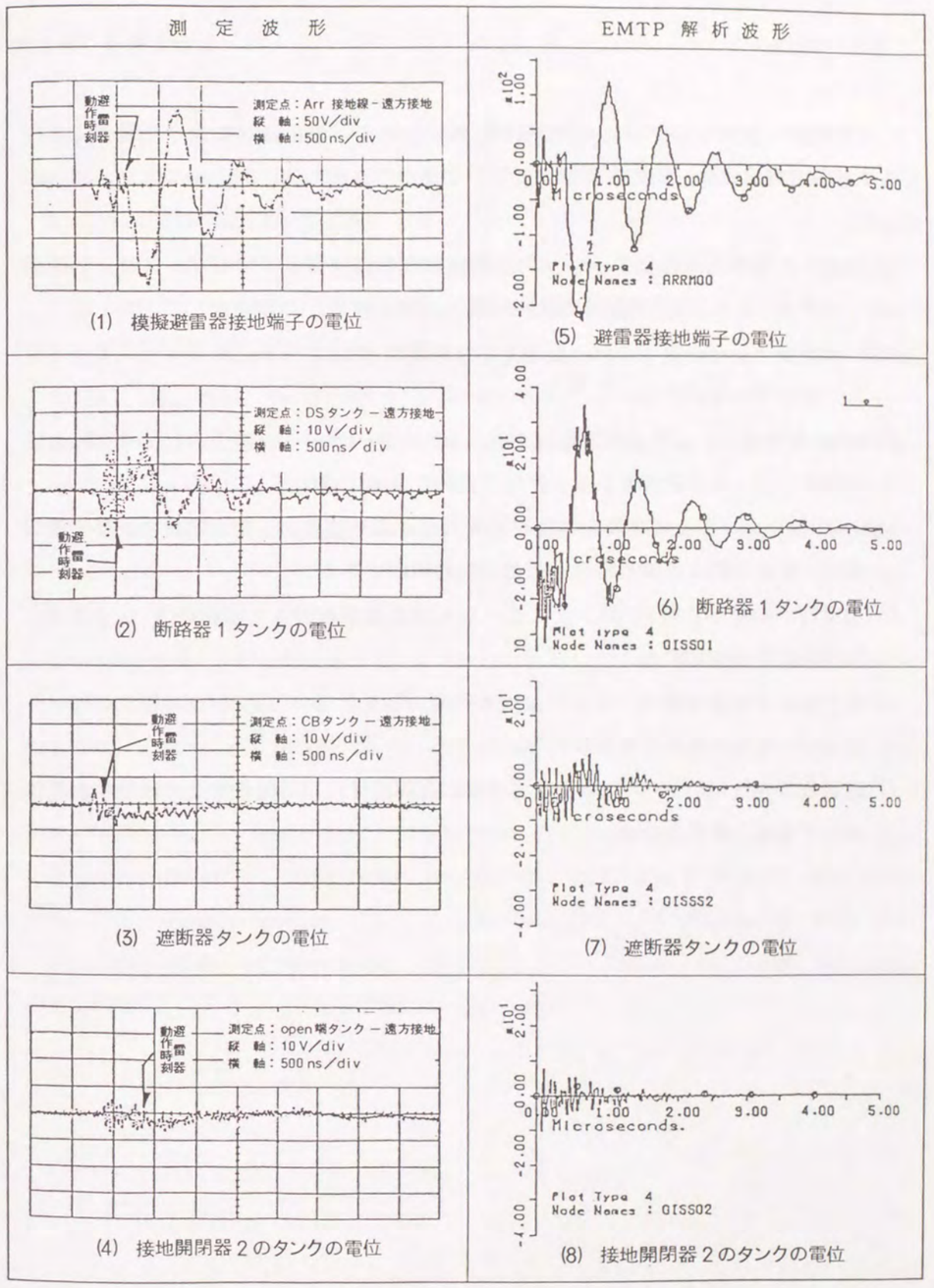


図 4.16　実測波形と解析波形との比較

4.4 まとめ

本章では、雷サージがGISへ送電線を伝搬してきて、避雷器が動作した場合に発生する接地系の高周波サージの実測結果について述べた。そして、以下のことを、明らかにした。

(1)測定した標準的な接地メッシュの最も簡単な等価過渡インピーダンスは、1μHのインダクタンスと3Ωの抵抗の直列回路で表わされる。

(2)この等価インピーダンスは、立ち上がり時間が100nsから2μSまでの流入電流に対して適用できる。

(3)GISの接地メッシュに急峻波電流が流入したときのメッシュ電圧のピーク値は主に接地インピーダンスのインダクタンス成分によって決まる。

(4)GISの接地メッシュに急峻波電流が流入したときの接地メッシュ電位の上昇する領域は、電流の流入点の近傍1.5m程度以内の範囲である。

(5)避雷器が動作した時GISタンクには、基本周波数が数MHzで継続時間5μs程度の高周波電圧が発生する。

(6)避雷器の定格放電電流(10kA)が接地系へ流入したときのGISタンクの電位のピーク値は20kV程度であると考えられる。

(7)避雷器動作時にGISタンクを含む接地系に高周波サージが発生するのは避雷器近傍のみであると考えられる。

第4章　参考文献

1)S. Karaki, T. Yamazaki, K. Nojima, T. Yokota, H. Murase, Takahashi, S. Kojima : "Transient Impedance of GIS Grounding Grid", IEEE PWRD, Vol.10, No.2, p.p.723-731, April 1995

2)三谷　弘　:　接地抵抗のサージ特性、電気評論, p.p.593-598, 1986

3)三谷　弘　:　接地抵抗のサージ特性とその測定法、電気評論, p.p.441-449, 1989

4)B. R. Gupta, V. K. Sign : "Impulse Impedance of Rectangular Grounding Grids", IEEE PWRD, Vol.7, No.1, p.p. 214-218, January 1992

5)B. R. Gupta, B. Thapar : "Impulse Impedance of Grounding Grids", IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-99, No.6, p.p. 2357-2362, Nov/Dec 1980

6)R. Verma, D. Mukhedkar : "Fundamental Considerations and Impulse Impedance of Grounding Grid", IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-100, No.3, p.p.1023-1030, March 1981

7)Kameyama F.H. , Altafim R.A.C. : "Earthing Electrodes Modelling for Impulse Current", 6th ISH, 42.10, August 1989

8)E. D. Sunde, : "Surge Characteristics of a Buried Bare Wire", AIEE Transactions, Vol.59, p.p.987-991, 1940

9)R. Velazquez, D. Mukhedkar : "Analytical Modelling of Grounding Electrodes Transient Behavior", IEEE Trans. On PAS-103, No.6, p.p.1314-1322, June 1984

10)A. D. Papalexopoulos, A. P. Meliopoulos : "Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems", IEEE Trans. On Power Delibery, Vol.PWRD-2, No.4, p.p.1073-1081, October 1987

第5章　GIS開閉動作による接地系の高周波サージ

5.1　まえがき

GISの断路器を開閉動作させたり、ガス遮断器を投入動作させると、SF_6ガス中での放電が生じ、GISの高電圧導体とタンクとの間に高周波サージが発生する[1)2)]。この高周波サージが接地系へ伝搬すると、接地系にも高周波サージが発生する[3)4)5)6)]。開閉装置の動作回数は、雷による避雷器の動作回数よりも著しく多く、また、一般に1回の開閉操作で多数回高周波サージが発生する。このように発生頻度が多い高周波サージの特徴を、実際の電力設備の構成について調査しておくことは、低電圧装置への誘導障害を検討するうえで重要である。ここでは、代表的構成の66kVGIS-ケーブル系設備を例に取り、GISのガス遮断器を投入動作させたときに接地系に現れる高周波サージの特徴を調査した[6)]。

5.2　実験方法

図5.1にGISケーブル系変電設備を模擬した実験装置の構成を示す。実験装置は、66kVのGIS、変圧器、電力ケーブルおよび充電電源から構成されている。GISはガス遮断器と若干長のガス絶縁母線とから成っており、それ自体は絶縁区分部を有していない。GISの電源側と充電電源との間は100mの電力ケーブルで接続した。GISの負荷側と変圧器との間は20mの電力ケーブルを用いて接続した。GISと変圧器とは近接しており、充電電源はGISから離れた遠方にある。電力ケーブルとGISまたは変圧器とはブッシングによって接続されている。電力ケーブル、GISおよび変圧器は、実設備と同様に、5m程度の長い$100mm^2$の被覆接地線によって接地杭に接地した。実設備における電源側背後系統の静電容量を模擬するため、コンデンサ（0.85 μ F）を充電電源と並列に接続した。コンデンサと100mの電力ケーブル端子との間には遠方の電力設備での遮断器の開閉動作を模擬するための放電ギャップを取り付けられる様にした。実験では、GISのガス遮断器を開閉するときはこのギャップは閉じておき、逆にこのギャップの放電で遠方での投入動作を模する時には、ガス遮断器は閉じた状態とした。充電電圧は$66kV \times \sqrt{2}/\sqrt{3} = 54kV$とした。接地電位振動を抑制する目的で使用されることの多い埋

設接地メッシュの効果を測定するため、土中には、500mm 深さに 100mm^2 の裸導線を 1m 間隔で格子状に埋設し、10m×10m の広さの接地メッシュを埋設しておいた。ガス遮断器または放電ギャップを投入動作させた時に GIS タンクおよび電力ケーブル金属シースの接地線に流れる電流を測定した。電流の測定には、3 章で述べた電流測定系を用いた。

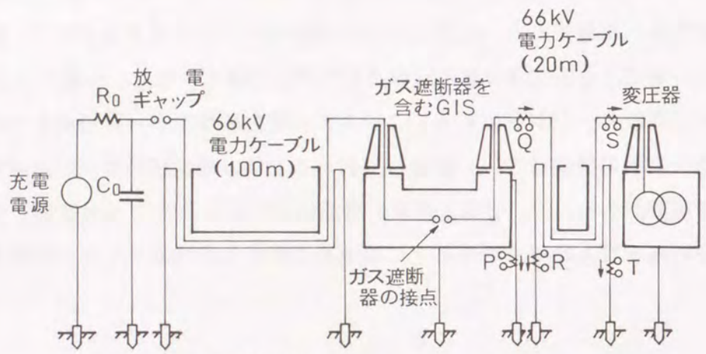
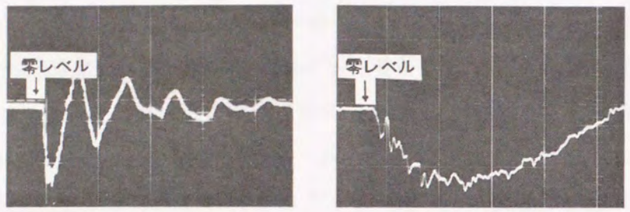


図 5.1　実験装置の構成

5.3　接地系に発生するサージ

ガス遮断器を投入した時に GIS タンクの接地線に流れる電流を、図 5.1 の P 点で測定した結果を図 5.2(a),(b)に示す。同図(b)は同図(a)の A 部を拡大したものである。電流波形には 500kHz 程度の比較的低い周波数成分の他に 10MHz を越す非常に高い周波数成分が含まれていることが分かる。GIS の負荷側の電力ケーブルと変圧器とを取り除いて同様にガス遮断器を投入したとき、図 5.1 の P 点で測定した電流の測定波形例を図 5.3(a),(b)に示す。同図(b)は同図(a)の A 部を拡大したものである。この場合には、電流波形には 500kHz 程度の周波数成分が見られなくなり 10MHz を越す周波数成分のみになっている。このことから、500kHz 程度の周波数成分は、電力ケーブルを含む GIS の負荷側の回路が関係したものであることが分かる。もう一度、GIS の負荷側の電力ケーブルと変圧器とを取り付け、図 5.1 の Q 点で測定した GIS から負荷側電力ケーブルへ高電圧回路を流れる電流を電流と、図 5.1 の R 点で測定した電力ケーブルの接地線に流れる電流とを比較すると図 5.4(a),(b)の様になる。同図の(a)と(b)の波形の 500kHz 成分電流は、波形も大きさも良く一致しており、ピーク値が 400A 程度である。この時、図 5.1 の S 点で測定した電力ケーブルから変圧器へ流れる高電圧回路の電流の大きさは 50A 以下と小さかった。また、図 5.1 の T 点で測定した電力ケーブルのシースに流れる電流も 50A 以下で小さかった。これらのことから、高電圧回路を通して GIS から負荷側電力ケーブルへ流れ込んだ電流の大部分が図 5.1 の R 点の電力ケーブルの接地線を通して接地杭へ流れ込んでいることが分かる。これは、周波数 500kHz 程度の電流は、電力ケーブルの静電容量を通して電力ケーブルの金属シースへ流れ、さらに電力ケーブル金属シースに沿って GIS へ向かって流れた後、電力ケーブル金属シースと GIS タンクとが直接に接続されていないため R 点の接地線を通して接地杭へと流れていることを示している。図 5.3 で示した様に、10MHz を超す高い周波数成分は負荷側の電力ケーブルが無い状態でも発生している。電源側に接続された電力ケーブルにおいては、長さが 100m であって対地静電容量が大きくまた進行波の往復伝搬時間も長くなるのでこの様な高い周波数の発生は考えられない。この様な高い波数の発生する原因として考えられるのは、GIS 回路部分での往復反射振動である。

遠方の遮断器の動作を模擬するための放電ギャップを放電させて高電圧回路を投入したときに図 5.1 の P 点で測定した GIS タンクの接地線に流れる電流を図 5.5(a)、(b)に示す。同図の電流波形には図 5.2 に示した波形とは違って 500kHz 程度の周波数成分しか含まれておらず 10MHz 以上の周波数成分が現れないことが分かる。これらのことから、接地系に発生する 10MHz を越す非常に高い周波数のサージは、近接 GIS の開閉の動作に特徴的なものと言える。



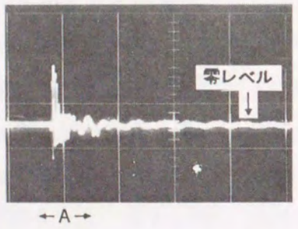
縦軸：40 A／div
横軸：2 μs／div

(a) GISの接地線を
通して流れる電流

縦軸：40 A／div
横軸：200 ns／div

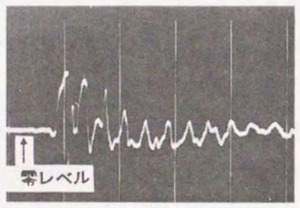
(b) (a)図のA部拡大

図 5.2　GISタンクの接地線に流れる電流
（負荷側回路 有り，図 5.1 のP点で測定）



縦軸：20 A／div
横軸：2 μs／div

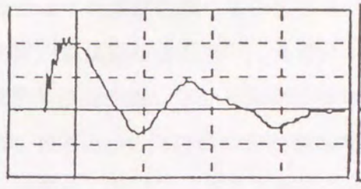
(a) GISの接地線を
通して流れる電流



縦軸：20 A／div
横軸：200 ns／div

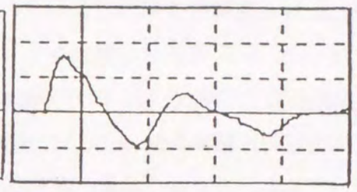
(b) (a)図のA部拡大

図 5.3　GISタンクの接地線に流れる電流
（負荷側回路 無し，図 5.1 のP点で測定）



(a) 負荷側電力ケーブルへ流入
する高電圧回路電流

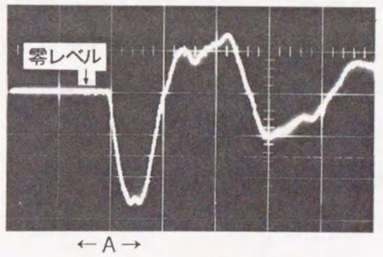
縦軸：200 A／div
横軸：1 μs／div



(b) 電力ケーブル接地線電流

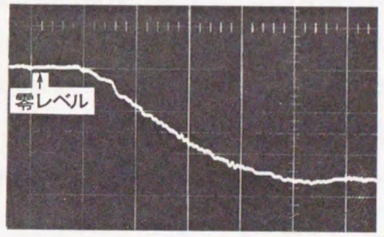
縦軸：200 A／div
横軸：1 μs／div

図 5.4　ガス遮断器投入時に負荷側電力ケーブルへ
流入する電流と電力ケーブル接地線の電流



(a) GIS接地線電流

縦軸：40 A／div
横軸：2 μs／div



(b) (a)図のA部拡大図

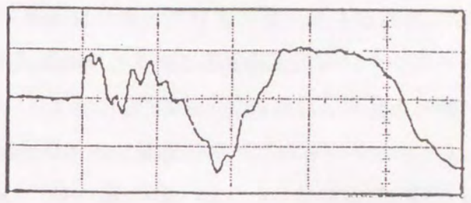
縦軸：40 A／div
横軸：200 ns／div

図 5.5　GISタンクの接地線に流れる電流
（遠方の放電ギャップ放電時）

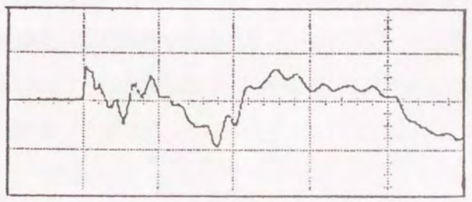
5.4　接地メッシュの効果

接地電位振動を抑制する目的で使用されることの多い埋設接地メッシュの効果について検証を行った。GIS タンクと電力ケーブル金属シースおよび模擬変圧器タンクを1本の接地杭に接続した状態で GIS のガス遮断器を投入させて、接地杭の基準接地点に対する電位を測定した。結果を図 5.6(a)に示す。接地杭の電位は 10ns 程度で非常に急峻に立ち上がっており、その後 500kHz 程度の周波数で振動している。急峻な立ち上がりを示す波形の初期の部分における電位のピーク値は 1.6kV であり、500kHz の振動部のピーク値は 3kV であった。GIS と電力ケーブルおよび模擬タンクを接地メッシュの同一点に接続した時の、メッシュと接地線との接続点の電位の測定結果を図 5.6(b)に示す。接地メッシュの電位波形も、接地杭の電位波形と同様に 10ns 程度の立ち上がり峻度が大きい初期部分と、それに続く 500kHz 程度の振動成分が支配的となる部分とからなっている。波形の初期部分の電位のピーク値は 1.4kV であり、500kHz の振動部分のピーク値は 1.5kV であった。接地杭および接地メッシュの電位波形の初期部分に見られる急峻な立上り部分を比較すると、接地メッシュで接地した場合の電圧ピーク値は接地杭で接地した場合の 90%程度にしか減少していない。これは、接地メッシュが 10MHz を超す非常に高い周波数のサージに対しては、接地電位低減の効果をほとんど持たないことを示している。これに対して 500kHz 程度の電位振動のピーク値は、接地メッシュで接地した場合には接地杭で接地した場合の 50%近くに低減されており、埋設接地メッシュを用いたことによる低減効果が見られる。

このように、接地メッシュによる接地電位振動抑制効果を期待できるのは、数100kHz 以下の周波数のサージに対してであり、10MHz を越す高周波サージに対してはその抑制効果はほとんど期待できない。



(a)　接地杭の電位振動
（接地杭で接地した場合）
縦軸：2 kV／div
横軸：500ns／div



(b)　接地メッシュの電位振動
（接地メッシュで接地した場合）
縦軸：2 kV／div
横軸：500 ns／div

図 5.6　接地電位の測定結果

5.5 まとめ

本章では、66kVの実規模実験装置を用いてGIS－ケーブル系でGISのガス遮断器を投入動作した時に接地系に発生するサージとこれに対する接地系の応答を実測した結果について述べた。そして、以下のことを明らかにした。

(1)GIS－ケーブル系において、GISのガス遮断器を投入動作させたときに接地系に発生するサージは数100kHz程度の電力ケーブルを含めた回路全体で決まる周波数成分と、GIS部分での往復反射振動で決まる10MHzを超す周波数成分とを持つ。

(2)数100kHzの周波数の高周波電流は、GISタンクや電力ケーブル金属シースが絶縁区分されている場所に近い接地線を通して接地杭や接地メッシュへ流れる。

(3)接地系の高周波サージに含まれる10MHzを超す高周波成分は、近接するGISの開閉装置を動作させた場合に特徴的に発生する。

(4)埋設接地メッシュは、数100kHz程度のサージに対しては接地電位振動の抑制効果を持つが、10MHzを超す高周波サージに対しては抑制効果を持たない。

第5章　参考文献

1)Boggs S. A., Chu F. Y., Fujimoto N. : "Disconnct Switch Induced Transients and Trapped Charge in GIS", IEEE Trans., Vol.PAS-101, No.10, p.p.3593-3602, October 1982

2)H. Murase, I. Ohshima, H. Aoyagi, I. Miwa : "Measurement of Transient Voltages Induced by Disconnect Switch Operation", IEEE Trans., Vol.PAS-104, No.1, p.p.157-165, January 1985

3)N. Fujimoto, E.P. Dick, S.A. Boggs and G.L. Ford : "Transient Potential Rise In Gas Insulated Substations - Experimental Studies", IEEE Trans., Vol. PAS-101, No.10, p.p.3603-3609 October 1982

4)A. Welsch : "Outcoupling and external phenomena of Very Fast Transients (VFT) in GIS", 6th ISH, 49.05, August 1989

5)F. Noack, P. Zahlmann, R. Brocke, J. Schwarz : "Fast Transients in the Earthing System in GIS", CIGRE 1988 Session, August 1988

6)野嶋健一、西脇　進、和田　哲、柳父　悟：
"ケーブル系GISの開閉サージによるエレクトロニクス機器への誘導障害",
電気学会論文誌　B，１１１巻，３号，p.p.314-323，平成３年

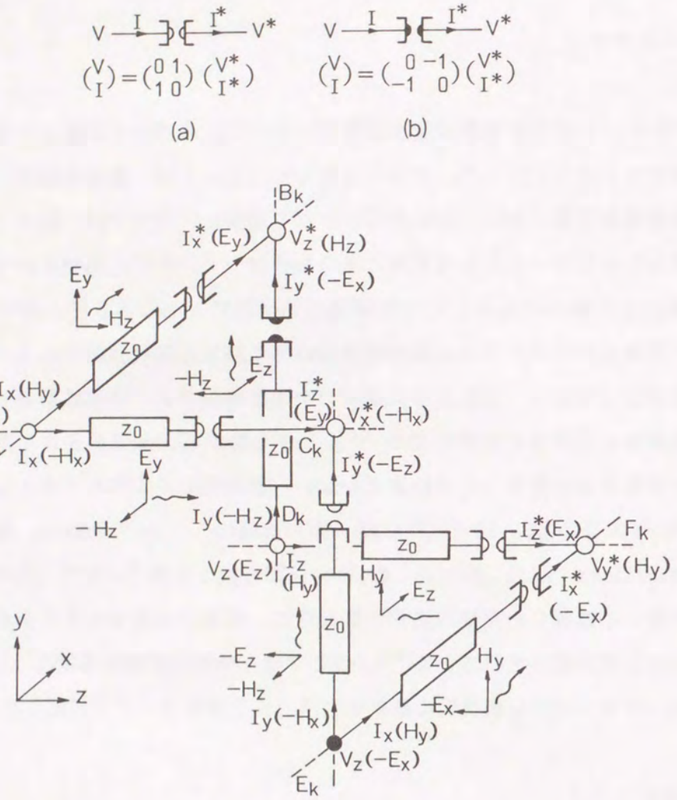
第 6 章　高周波サージの伝搬機構の解析

6.1　まえがき

近年のディジタル計算機の急速な発達によって、高速・大容量の計算機を比較的容易に利用できるようになった。高電圧技術分野においては、静電界解析・静磁界解析・過渡回路現象解析等において解析手法がかなり進歩し、現在では、設計・開発部門において有効なＣＡＥツールとして利用できる解析コードがすでに開発されている。高電圧技術に関連する解析技術として今後開発が期待されるものとして、雷サージ・断路器サージ・高周波パルスに伴う高周波過渡電磁界に関する解析技術がある。高周波過渡電磁界解析手法についてもこれまでに種々の手法が検討され、送電鉄塔のサージインピーダンス解析等に応用された例もある [1)2)]。しかしながら、多媒質を含んだ系全体の過渡伝磁界を解析できる解析コードはまだ少ない。過渡電磁界の解析方法としては、有限要素法やモーメント法、FD-TD(Finite Difference Time Domain Method)および TLM(Transmission Line Matrix Method)が知られている [3)]。近年、TLM 法をベルジェロン法を用いて拡張した空間回路網が提案され、媒質の分散特性をも含めた過渡電磁界解析への応用例が報告されている [4)5)]。ここでは、空間回路網法を取り上げ、GIS における接地系へのサージの伝搬機構の解析へ適用できる解析コードを作成した。

6.2　解析コード

空間回路網法では、解析対象の空間を 3 次元立方格子網に分割する。空間を分割して作成した k 番めの立方体格子に注目し、空間回路網法で使用する 6 個の格子節点を A_k、B_k、C_k、D_k、E_k、F_k とすると、この離散化された空間でマクスウェルの方程式を成立させるためには、これらの節点間には図 6.1 に示したような基本等価回路網を構成する必要がある [3)4)]。マクスウェルの方程式を成立させるため、各節点の電圧・電流にはそれぞれ、電界および磁界の x, y, z 方向各成分が図 6.1 中に示した様に対応する。各節点における回路変数、回路定数と電磁界変数および媒質定数との対応をまとめて表 6.1 に示す。



(a) 正ジャイレータ
(b) 負ジャイレータ
(c) 基本的回路構成

図 6.1 空間回路網
（基本格子）

＊ 電気情報通信学会「電磁波問題の基礎解法」[3]より転載

表 6.1 等価回路の各節点における回路変数，回路定数と電磁界変数および媒質定数との対応

	電気的節点			磁気的節点	
	マモスウェル方程式	変数の対応		マクスウェル方程式	変数の対応
A_n	$\frac{\partial H_x}{\partial z}-\frac{\partial H_z}{\partial x}=\varepsilon_0\frac{\partial E_y}{\partial t}$	$V_y \equiv E_y$	F_n	$\frac{\partial H_z}{\partial z}-\frac{\partial E_x}{\partial x}=-\mu_0\frac{\partial H_y}{\partial t}$	$V_y^* \equiv H_y$
	$-\frac{\partial E_y}{\partial z}=-\mu_0\frac{\partial H_x}{\partial t}$	$I_z \equiv -H_x$		$-\frac{\partial H_y}{\partial z}=\varepsilon_0\frac{\partial E_x}{\partial t}$	$I_z^* \equiv E_x$
	$\frac{\partial E_y}{\partial x}=-\mu_0\frac{\partial H_z}{\partial t}$	$I_x \equiv H_z$		$\frac{\partial H_y}{\partial x}=\varepsilon_0\frac{\partial E_z}{\partial t}$	$I_x^* \equiv -E_z$
D_n	$\frac{\partial H_z}{\partial y}-\frac{\partial H_y}{\partial z}=\varepsilon_0\frac{\partial E_x}{\partial t}$	$V_x \equiv E_z$	B_n	$\frac{\partial E_y}{\partial x}-\frac{\partial E_x}{\partial y}=-\mu_0\frac{\partial H_z}{\partial t}$	$V_z^* \equiv H_z$
	$\frac{\partial E_x}{\partial z}=-\mu_0\frac{\partial H_y}{\partial t}$	$I_z \equiv H_y$		$\frac{\partial H_z}{\partial y}=\varepsilon_0\frac{\partial E_x}{\partial t}$	$I_y^* \equiv -E_x$
	$-\frac{\partial E_x}{\partial y}=-\mu_0\frac{\partial H_z}{\partial t}$	$I_y \equiv -H_z$		$-\frac{\partial H_z}{\partial x}=\varepsilon_0\frac{\partial E_y}{\partial t}$	$I_x^* \equiv E_y$
E_n	$\frac{\partial H_y}{\partial x}-\frac{\partial H_x}{\partial y}=\varepsilon_0\frac{\partial E_z}{\partial t}$	$V_z \equiv -E_z$	C_n	$\frac{\partial E_z}{\partial y}-\frac{\partial E_y}{\partial z}=-\mu_0\frac{\partial H_x}{\partial t}$	$V_x^* \equiv -H_x$
	$\frac{\partial E_z}{\partial y}=-\mu_0\frac{\partial H_x}{\partial t}$	$I_y \equiv -H_x$		$\frac{\partial H_x}{\partial z}=\varepsilon_0\frac{\partial E_y}{\partial t}$	$I_z^* \equiv E_y$
	$-\frac{\partial E_z}{\partial x}=-\mu_0\frac{\partial H_y}{\partial t}$	$I_x \equiv H_y$		$-\frac{\partial H_x}{\partial y}=\varepsilon_0\frac{\partial E_z}{\partial t}$	$I_y^* \equiv -E_z$
分電率	$C_0=\varepsilon_0/2$		誘電率	$L_0^*=\varepsilon_0/2$	
誘磁率	$L_0=\mu_0/2$		透磁率	$C_0^*=\mu_0/2$	
分極率	$\Delta C=\varepsilon_0\chi_0/2\cdot\Delta d$		磁化率	$\Delta C^*=\mu_0\chi_m/2\cdot\Delta d$	
導電率	$G=\sigma/2\cdot\Delta d$		磁流導電率	$G^*=\sigma^*/2\cdot\Delta d$	

＊ 電気情報通信学会「電磁波問題の基礎解法」[3]より転載

表 6.1 の回路変数に対応して、各格子点への x 方向からの流入電流を I_{x1} または I^*_{x1}、流出電流を I_{x2} または I^*_{x2} と表す。同様に y 方向からの流入電を I_{y1} または I^*_{y1}、流出電流を I_{y2} または I^*_{y2} と表す。z 方向については、流入電流を I_{z1} または I^*_{z1}、流出電流を I_{z2} または I^*_{z2} と表す。節点 A_k の格子点座標を整数 l, m, n を用いて（l, m, n）とするとき、接点間を結ぶ分布定数線路の特性インピーダンスが $z_0=\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$ であるとすると、ベルジェロン法を用いて接点 A_k に関する電圧電流についての次式が得られる。

$$I_{z1}(l,m,n,t)=-\frac{1}{z_0}V_y(l,m,n,t)+V_x^*(l,m,n-1,t-\Delta t)+\frac{1}{z_0}I_{z2}^*(l,m,n-1,t-\Delta t)$$

$$I_{z2}(l,m,n,t)=\frac{1}{z_0}V_y(l,m,n,t)+V_x^*(l,m,n+1,t-\Delta t)-\frac{1}{z_0}I_{z1}^*(l,m,n+1,t-\Delta t)$$

$$I_{x1}(l,m,n,t)=-\frac{1}{z_0}V_y(l,m,n,t)+V_z^*(l-1,m,n,t-\Delta t)+\frac{1}{z_0}I_{x2}^*(l-1,m,n,t-\Delta t)$$

$$I_{x2}(l,m,n,t)=\frac{1}{z_0}V_y(l,m,n,t)+V_z^*(l+1,m,n,t-\Delta t)-\frac{1}{z_0}I_{x1}^*(l+1,m,n,t-\Delta t)$$

節点 B_k の格子点座標を（1, m, n）とすると、B_k についての特性インピーダンスを $z_0^*=z_0^{-1}$ として、次式が成立する。

$$I_{y1}^*(l,m,n,t)=-\frac{1}{z_0^*}V_z^*(l,m,n,t)-V_x(l,m-1,n,t-\Delta t)-\frac{1}{z_0^*}I_{y2}(l,m-1,n,t-\Delta t)$$

$$I_{y2}^*(l,m,n,t)=\frac{1}{z_0^*}V_z^*(l,m,n,t)-V_x(l,m+1,n,t-\Delta t)+\frac{1}{z_0^*}I_{y1}(l,m+1,n,t-\Delta t)$$

$$I_{x1}^*(l,m,n,t)=-\frac{1}{z_0^*}V_z^*(l,m,n,t)+V_y(l-1,m,n,t-\Delta t)+\frac{1}{z_0^*}I_{x2}(l-1,m,n,t-\Delta t)$$

$$I_{x2}^*(l,m,n,t)=\frac{1}{z_0^*}V_z^*(l,m,n,t)+V_y(l+1,m,n,t-\Delta t)-\frac{1}{z_0^*}I_{x1}(l+1,m,n,t-\Delta t)$$

同様に、節点 C_k については、その格子点座標を（1, m, n）として、次式が成立する。

$$I_{y1}(l,m,n,t)=-\frac{1}{z_0^*}V_y^*(l,m,n,t)+V_z(l,m-1,n,t-\Delta t)+\frac{1}{z_0^*}I_{z2}(l,m-1,n,t-\Delta t)$$

$$I_{y2}(l,m,nt)=\frac{1}{z_0^*}V_y^*(l,m,n,t)+V_z(l,m+1,n,t-\Delta t)-\frac{1}{z_0^*}I_{z2}(l,m+1,n,t-\Delta t)$$

$$I_{z1}(l,m,n,t)=-\frac{1}{z_0^*}V_y^*(l,m,n,t)+V_y(l,m,n-1,t-\Delta t)+\frac{1}{z_0^*}I_{x2}(l,m,n-1,t-\Delta t)$$

$$I_{z2}(l,m,n,t)=\frac{1}{z_0^*}V_y^*(l,m,n,t)+V_y(l,m,n+1,t-\Delta t)-\frac{1}{z_0^*}I_{x1}(l,m,n+1,t-\Delta t)$$

節点 D_k の格子点座標を（1, m, n）とすると、接点 A_k についてと同様にして次式が成立する。

$$I_{z1}(l,m,n,t)=-\frac{1}{z_0}V_x(l,m,n,t)+V_x^*(l,m,n-1,t-\Delta t)+\frac{1}{z_0}I_{z2}^*(l,m,n-1,t-\Delta t)$$

$$I_{z2}(l,m,n,t)=\frac{1}{z_0}V_x(l,m,n,t)+V_x^*(l,m,n+1,t-\Delta t)-\frac{1}{z_0}I_{z2}^*(l,m,n+1,t-\Delta t)$$

$$I_{y1}(l,m,n,t)=-\frac{1}{z_0}V_x(l,m,n,t)-V_z^*(l,m-1,n,t-\Delta t)-\frac{1}{z_0}I_{x2}^*(l,m-1,n,t-\Delta t)$$

$$I_{y2}(l,m,n,t)=\frac{1}{z_0}V_x(l,m,n,t)-V_z^*(l,m+1,n,t-\Delta t)+\frac{1}{z_0}I_{x1}^*(l,m+1,n,t-\Delta t)$$

同様に、節点 E_k の格子点座標を（1, m, n）とすると、次式が成立する。

$$I_{x1}(l,m,n,t)=-\frac{1}{z_0}V_z(l,m,n,t)+V_y^*(l-1,m,n,t-\Delta t)+\frac{1}{z_0}I_{x2}^*(l-1,m,n,t-\Delta t)$$

$$I_{x2}(l,m,n,t)=\frac{1}{z_0}V_z(l,m,n,t)+V_y^*(l+1,m,n,t-\Delta t)-\frac{1}{z_0}I_{x1}^*(l+1,m,n,t-\Delta t)$$

$$I_{y1}(l,m,n,t)=-\frac{1}{z_0}V_z(l,m,n,t)+V_x^*(l,m-1,n,t-\Delta t)+\frac{1}{z_0}I_{y2}^*(l,m-1,n,t-\Delta t)$$

$$I_{y2}(l,m,n,t)=\frac{1}{z_0}V_z(l,m,n,t)+V_x^*(l,m+1,n,t-\Delta t)-\frac{1}{z_0}I_{y1}^*(l,m+1,n,t-\Delta t)$$

同様に、節点 Fk の格子点座標を（1, m, n）とすると接点 B_k と同様に次式が成立する。

$$I^*_{x1}(l,m,n,t) = -\frac{1}{z^*_0}V^*_y(l,m,n,t) + V_x(l-1,m,n,t-\Delta t) + \frac{1}{z^*_0}I^*_{z2}(l-1,m,n,t-\Delta t)$$

$$I^*_{x2}(l,m,n,t) = \frac{1}{z^*_0}V^*_y(l,m,n,t) + V_x(l+1,m,n,t-\Delta t) - \frac{1}{z^*_0}I^*_{z2}(l+1,m,n,t-\Delta t)$$

$$I^*_{z1}(l,m,n,t) = -\frac{1}{z^*_0}V^*_y(l,m,n,t) + V_z(l,m,n-1,t-\Delta t) + \frac{1}{z^*_0}I^*_{x2}(l,m,n-1,t-\Delta t)$$

$$I_{z2}(l,m,n,t) = \frac{1}{z^*_0}V^*_y(l,m,n,t) + V_z(l,m,n+1,t-\Delta t) - \frac{1}{z^*_0}I^*_{x1}(l,m,n+1,t-\Delta t)$$

媒質条件は、図 6.2 に示す様に節点に媒質定数に対応した集中定数素子を並列接続することによって模擬できる[4)5)]。節点 A_k、D_k、E_kについては、それぞれの節点の電圧変数を V_u（ただし、u=x, y, z）とすると、媒質条件を模擬するコンダクタンスと静電容量を流れる電流 Ic と Id はそれぞれ次の様に表される。

$$I_d(l,m,n,t) = 4G(l,m,n)V_u(l,m,n,t)$$

$$I_c(l,m,n,t) = \frac{1}{R_c(l,m,n)}V_u(l,m,n,t) - \frac{1}{R_c(l,m,n)}V_u(l,m,n,t-\Delta t) - I_c(l,m,n,t-\Delta t)$$

ただし、$R_c(l,m,n) = \dfrac{1}{2(4\Delta C(l,m,n))}$

GおよびΔCについては、表6.1参照。

同様に節点 Bk、Ck、Fk については、それぞれの節点の電圧変数を V^*_u として、

$$I^*_d(l,m,n,t) = 4G^*(l,m,n)V^*_u(l,m,n,t)$$

$$I^*_c(l,m,n,t) = \frac{1}{R^*_c(l,m,n)}V^*_u(l,m,n,t) - \frac{1}{R^*_c(l,m,n)}V^*_u(l,m,n,t-\Delta t) - I^*_c(l,m,n,t-\Delta t)$$

ただし、$R^*_c(l,m,n) = \dfrac{1}{2(4\Delta C^*(l,m,n))}$

G^*およびΔC^*については、表6.1参照。

と表される。上記の時刻 t における電流式を用いて、それぞれの節点においてキルヒホッフの第 1 法則を成立させることによって、各節点の電圧変数に対応した電界および磁界を逐次算出することができる。この方法に基づいて解析コードを作成した[6)]。

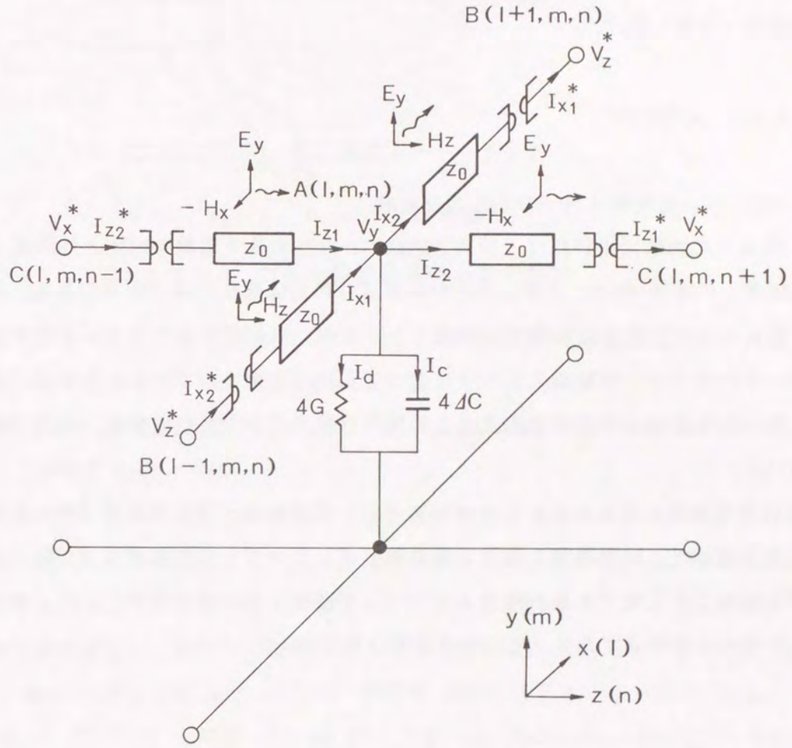


図 6.2　A（l, m, n）点での媒質条件を含む等価回路

＊ 電気情報通信学会「電磁波問題の基礎解法」[3)]より転載

6.3　タンク内部におけるサージ伝搬現象解析への適用

作成した解析コードの妥当性を検証するため、コーン型絶縁スペーサを含む GIS 母線とT字型分岐を含む GIS 母線における TEM モードステップ波電圧の伝搬特性を解析し、実測波形と比較した[7]。

6.3.1　実測波形

(1)コーン型絶縁スペーサからの反射波

図 6.3 に実験に用いたコーンス型絶縁ペーサを有する母線を示す。外直径 120mm の中心導体と内直径 434mm のタンクとから構成される実規模母線モデルである。この母線の絶縁スペーサを含まない部分の特性インピーダンスは 77 Ωである。このモデルの導体は、3枚のコーン型絶縁スペーサによって安定に支持されている。母線の両側には、中心導体の外直径とタンクの内直径との比が母線モデルのそれと等しい円錐型線路を取り付けた。

この円錐型線路には特性インピーダンス 75 Ωの同軸ケーブルを取り付けられるコネクタを取り付けた。同軸線路と供試母線の特性インピーダンスの誤差は 2.7%と小さく、実験上無視できる値である。図 6.4 にコーン型絶縁スペーサの形状を示す。絶縁スペーサはエポキシ注形品であり、その比誘電率は 6 である。

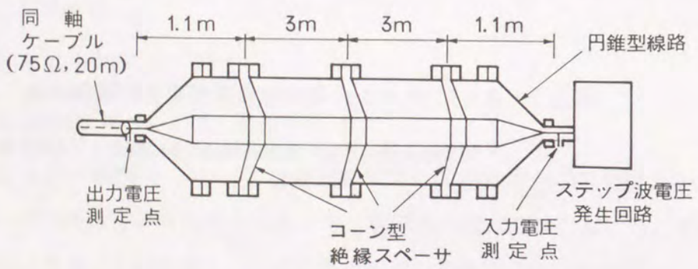
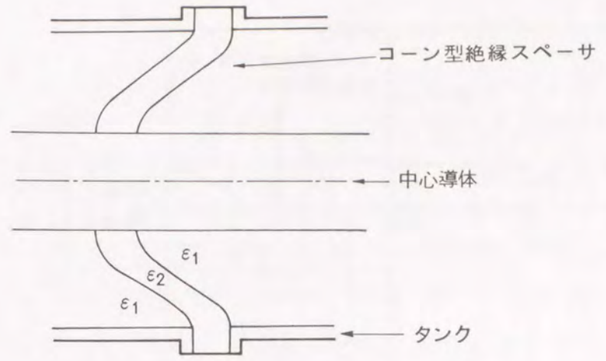


図 6.3　実規模母線モデルの構成
（3枚のコーン型絶縁スペーサを含む）



$\varepsilon_1 = 1$，$\varepsilon_2 = 6$，$\phi 120 / \phi 434$ 母線

図 6.4　コーン型絶縁スペーサの形状

この母線モデルに、ステップ波電圧を印加して、印加端での電圧を測定した。ステップ波電圧の伝搬特性を測定する実験の手順は次の通りである。

①一方の円錐型線路に、水銀スイッチを介して 50m の同軸ケーブルを接続する。

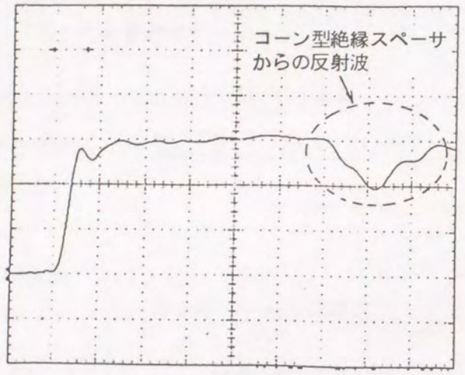
②同軸ケーブルを 60k Ωの抵抗を介した直流電源で充電する。

③水銀スイッチを閉じてステップ波電圧を発生させ、母線モデルに印加する。

④印加端および出力端の電圧波形を FET プローブで測定する。

円錐型線路を用いて電圧を印加しているため、印加波は TEM モードとみなすことができる。電圧の測定には、サンプリング時間 4GHz のディジタルオシロスコープ（Tektronix　TDS784A）と帯域 4GHz の FET プローブ（Tektronix　P6217）とを使用した。この測定系を用いて測定した印加ステップ波の立ち上がり時間は 0.5ns であった。

3枚のコーン型絶縁スペーサを有する実規模モデル母線にステップ波を印加した時に、電圧印加側の円錐型線路端で測定した電圧波形を図 6.5 に示す。立ち上がり時間が 0.5ns 程度のステップ波電圧が GIS 母線に印加されていることがわかる。電圧印加後 7.3ns の時刻から負反射波が観測されている。電圧印加端からみた最初の絶縁スペーサまでの距離が 1.1m であることから、この負反射波はコーン型絶縁スペーサからの反射波であることが分かる。絶縁スペーサからの反射波が負反射波であることは、GIS 母線中の絶縁スペーサは、進行波に対して静電容量として作用するとの報告[8]から予想される結果と一致する。



縦軸：1V／div
横軸：1.2ns／div

図 6.5　電圧印加端の実測電圧波形

(2) T 字型分岐部における透過波

実測に用いた T 字分岐を有する縮小 GIS 母線モデルを図 6.6 に示す。中心導体の外直径が 60mm であり、タンクの内直径は 210mm である。中心導体は 2mm 厚さの薄くて幅の狭い絶縁物で支えてある。支持絶縁物がステップ波電圧の伝搬特性へ与える影響が無視できることは、事前の測定によって確認しておいた。この縮小 GIS 母線の特性インピーダンスは、実規模母線と同じ 75 Ωである。コーン型絶縁スペーサからの反射波の実測の場合と同様に、縮小母線モデルの各端部には円錐型の線路を取り付け、水銀スイッチや同軸ケーブルを取り付けられる構成とした。

図 6.6 に示したT字型の分岐を有する縮小モデル母線のA端子にステップ波電圧を印加した時の、印加ステップ波電圧、および同図B端子およびC端子で測定した出力波形を、図 6.7(a)、(b)、(c)に示す。図 6.7(a)の印加波形の立ち上がり時間は 0.5ns である。図 6.7(b)に示すB端子の出力波形は、回路理論から計算される通り、レベルが印加ステップ波の 2/3 に減少している。波形の立ち上がり時間は印加波とほぼ同じで 0.5ns である。図 6.7(c)に示すC端子の出力波形は、レベルはやはり印加ステップ波の 2/3 である。しかし、同図の 30%－90%立ち上がり時間は 1ns であり、図 6.7(a)や図 6.7(b)の立ち上がり時間よりも長くなっている。図 6.6 のC端子から印加した場合のA端子およびB端子の出力波形は、図 6.7(c)とほぼ同じであった。これらの結果から、出力ステップ波の立ち上がり時間が長くなる現象は、電圧を印加した線路と直角な方向の線路への伝搬に特徴的であると考えられる。

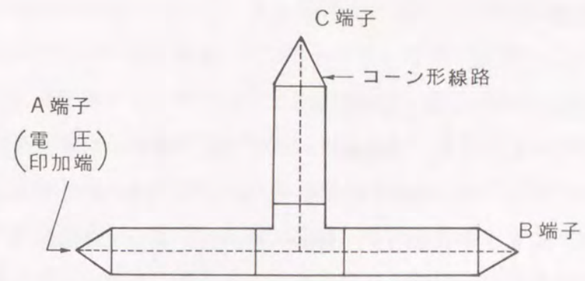
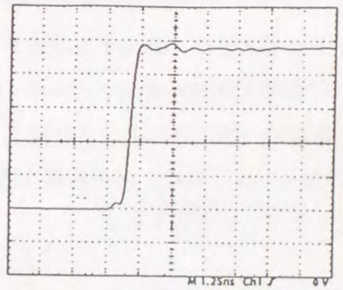
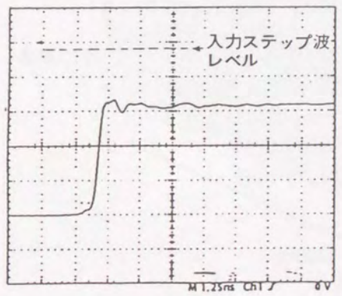


図 6.6　T 字型分岐 GIS モデル



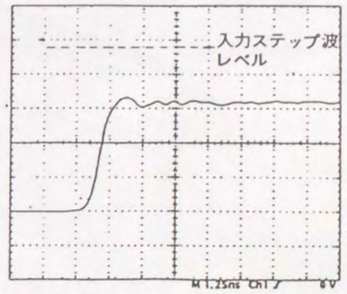
縦軸：5V／div
横軸：1.25ns／div

(a) A 端電圧波形
(入力端電圧)



縦軸：5V／div
横軸：1.25ns／div

(b) B 端出力電圧波形



縦軸：5V／div
横軸：1.25ns／div

(c) C 端出力電圧波形

図 6.7　T 字型分岐各端子での実測波形

6.3.2　解析結果

(1)コーン型絶縁スペーサからの反射波

図 6.8 に解析モデルを示す。同軸線路の中央に比誘電率 6 の誘電体からなるコーン型絶縁スペーサを有する、中心導体の外直径 120mm タンクの内直径 434mm の同軸線路である。本モデルは、図 6.3 の実験モデル母線において、コーン型絶縁スペーサを 1 枚だけにした線路に相当する。この解析モデルを、一辺の長さΔｄ＝3.3mm の立方格子に分割した。同軸円筒導体表面上では、Ez=0 となるものとして境界条件を設定した。すなわち、表 6.1 に示した回路変数において、節点 C が同軸導体表面上にあるときは、Iy(-Ez)=0 となるように隣接する節点 E との接続を切りはずした。同軸導体表面上にある節点 E については、Vz(-Ez)=0 となるように、節点Ｅを接地した。同軸導体表面上にある節点 F については、Ix(-Ez)=0 となるように、隣接する節点 E との接続を切り離した。絶縁スペーサは比誘電率が 6 で、厚さは実際の絶縁スペーサの平均厚さで一様な円錐型の誘電体で模擬した。そして、線路の一端に立ち上がり時間 0.5ns のステップ波電圧に対応する TEM モード波電界を印加した。これは、円錐線路を通して、0.5ns の立ち上がり時間のステップ波電圧を印加したことに対応する。

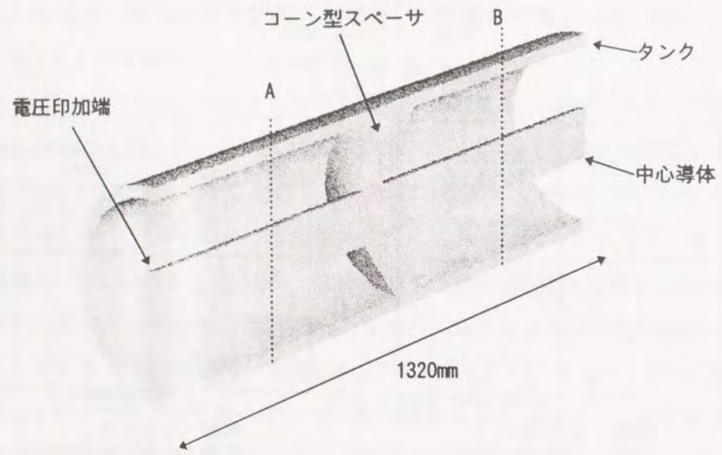


図 6.8　解析モデルの断面図
（φ120／φ434 GIS 母線，A,Bは電圧を計算する位置）

図 6.9 は電圧印加後 3.6ns の、y-z 断面内における電界分布の解析結果を示す。コーン型絶縁スペーサ部を透過して TEM モードの電界が伝播してゆく様子がわかる。また、コーン型絶縁スペーサからの負反射波によって、絶縁スペーサの電圧印加側の電界が小さくなっている様子もわかる。図 6.8 の A 断面での電界を積分して中心導体の電圧の時間変化を計算した結果を図 6.10(a)に示す。コーン型絶縁スペーサから電圧印加端へ向かって負反射波が伝搬しているのがわかる。図 6.10(b)は、図 6.8 の B 断面内での電圧の時間変化を示す。立ち上がり時間が 1ns 程度に長くなっていることがわかる。印加端で測定した第 1 番目の絶縁スペーサからの反射波を含む図 6.5 の実測波形と比較すると、コーン型絶縁スペーサからの反射波の波形やレベルは、図 6.5 の実測波形と図 6.10(a)の解析波形とで良く一致している。これらの結果は、開発した開発コードが、誘電体を含む GIS 線路における高周波サージの伝搬現象の解析に適用できることを示している。

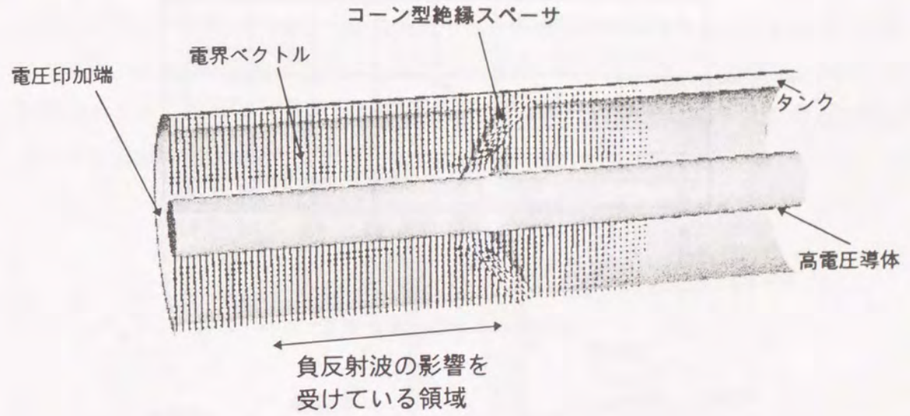
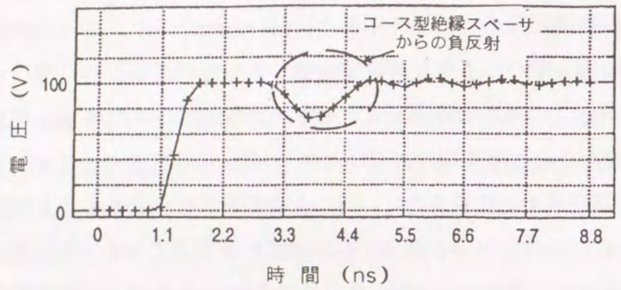
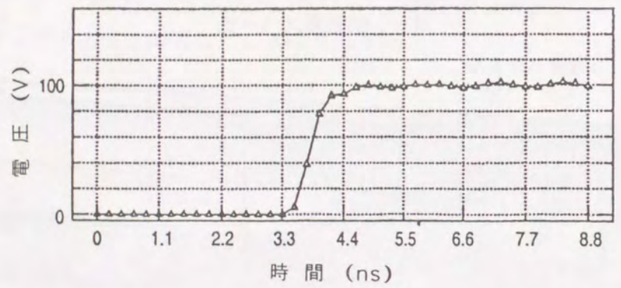


図 6.9　電界分布の解析例
（空間回路網法による解析結果、電圧印加後 3.6ｎｓ）



(a) 図6.8のA位置の電圧



(b) 図6.8のB位置の電圧

図6.10 高電圧導体の電圧
（空間回路網法による解析結果）

(2) T字分岐部における透過波

図 6.11 に解析モデルを示す。図 6.5 の縮小モデル母線の解析モデルである。この解析モデルを1辺の長さΔd＝3.3mm の立方格子に分割した。そして、線路の一端に立ち上がり時間 0.5ns の TEM モードのステップ波電界を印加した。これは、円錐線路を通して、0.5ns の立ち上がり時間のステップ波電圧を印加したことに対応する。図 6.12 は、電圧印加後 2.2ns の、y-z 断面内の電界分布の解析結果を示す。C 端子側への透過波の波面は、B 端子側への透過波の波面と違って先端が不揃いになっており、TEM 波として伝搬していない様子が見られる。各時刻における電界の計算結果から、図 6.11 において分岐部からの距離が等しい断面①、断面②および断面③の位置で中心導体とタンクとの間の電圧の時間変化を計算した。断面①の電圧波形の初期部分は印加電圧波を示す。断面②の電圧波形は、B 端子に向かって伝搬する電圧波形に対応する。断面③の電圧波形は、C 端子に向かって伝搬する電圧波形に対応する。結果を図 6.13 にまとめて示す。B 端子および C 端子への伝搬波の大きさは、印加電圧の 2/3 であり、理論値および実測値と一致している。また、実測と同様に B 端子への伝搬波である断面②での電圧波形の立ち上がり時間は、断面①に見られる印加波のそれとほぼ同じである。また、C 端子への透過波である断面③での電圧波形の立ち上がり時間は、実測と同様に印加波より長くなって 1ns 程度になっている。この様に、開発した解析コードから得られる結果は実測結果と良く一致しており、GIS における高周波サージの伝搬現象の解析に適用できることがわかる。

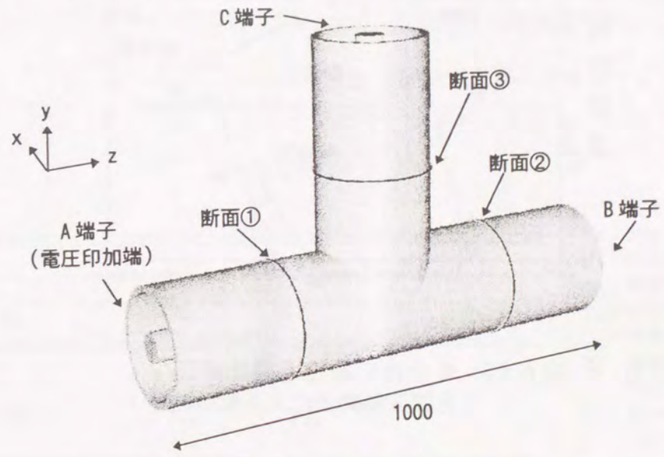


図6.11 解析モデル
（φ60／φ210 T字型分岐GISモデル）

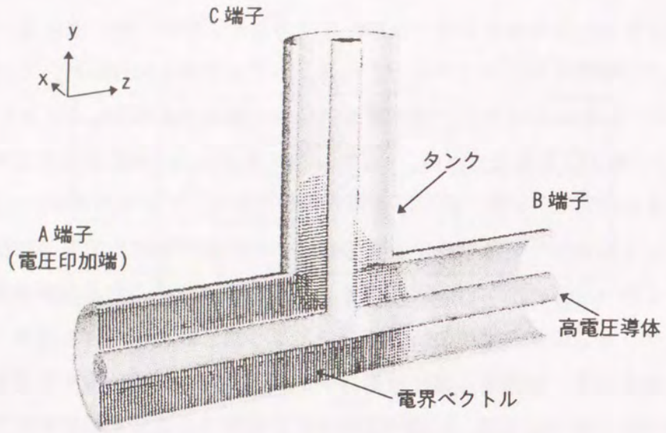


図6.12　y−z 断面上の電界分布の解析例
（φ60／φ210 GISモデル，部分断面図）

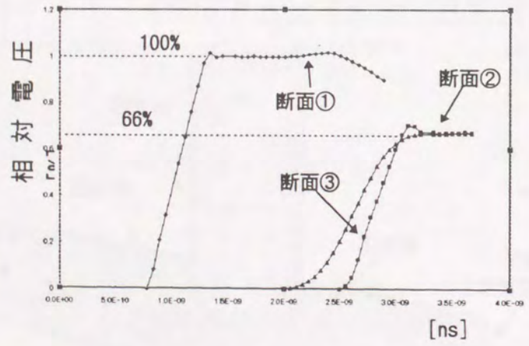


図6.13　各分岐における電圧波形
（空間回路網法による解析結果）

6.4 接地系へのサージ伝搬現象解析への適用

第２章で述べたように、GISタンク内部で発生した高周波サージは、タンクの絶縁区分部分(絶縁フランジ部やケーブルヘッド部)から接地系へ伝搬すると言われている。しかしながら、絶縁区分部分から接地系へサージが伝搬する時の電磁界の様子を解析した例はほとんどなかった。タンク内部から接地系へ高周波サージが伝搬する時の電磁界の様子を視覚的に捕らえることは、メカニズムの理解や接地系に発生する高周波サージの抑制方法を検討する上で有効である。ここでは、得られた過渡電磁界解析コードを用いて、GISタンクの絶縁区分部から接地系へ伝搬する高周波サージに伴う電界を解析した[6]。

6.4.1 理論的検討

図6.14にタンクに絶縁区分を持つ母線において、高周波サージがタンク内部から接地系へ伝搬する経路を示す。タンクの絶縁区分部からタンク外部へ伝搬した高周波サージは、絶縁区分の両側へそれぞれ伝搬してゆく。Fujimoto等が報告している様に、図6.14においてGIS高電圧導体とタンクとの間に発生した電圧E_0が接地系へ伝搬する移行係数は

$$T_{21} = \frac{-2Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3} \quad (6.1)$$

（絶縁区分部のサージ印加端側タンク外部への移行係数）

$$T_{41} = \frac{2Z_4}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3} \quad (6.2)$$

（絶縁区分部の負荷側タンク外部への移行係数）

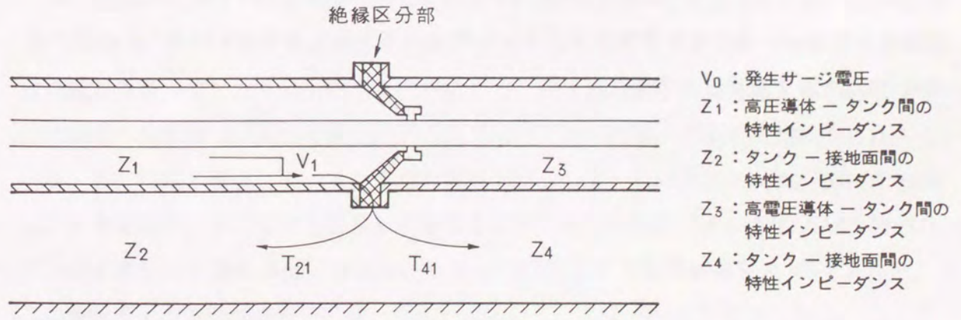


図6.14　絶縁区分部から接地系への高周波サージ伝搬

と表わされる[9)10)]。(6.1)式と(6.2)式とから分かる様に、T_{21}とT_{41}とは逆極性になっている。これは、絶縁区分の両側へ伝搬するサージ電圧の極性がお互いに逆極性になることを示している。図6.14の構成について過渡電磁界解析を実施した。

6.4.2 解析モデル

図6.15に解析モデルを示す。接地平板導体の上にz軸と平行な中心軸を持つ同軸円筒導体を配置した構成である。同軸円筒導体の外側導体は、GISのタンクを模擬している。同軸円筒導体の内側導体は高電圧導体を模擬している。タンクの絶縁区分部は、タンクに沿った電流経路のギャップとみなせるので、このモデルにおいてはタンクを2つに分割する円周状の小さいギャップによって模擬してある。解析対象とする領域を100×100×160個の立方体に分割した。そして、図6.1に示したのと同様の回路網を構成した。高電圧導体の直径は60mmであり、タンクの内径は210mm、タンクの外形は220mmである。同軸円筒導体の中心と接地面との間の距離は167mmとした。同軸円筒導体表面上では、Ez=0となるものとして境界条件を設定した。すなわち、表6.1の回路変数において、節点Cが同軸導体表面上にあるときは、Iy(-Ez)=0となるように、隣接する節点Eとの接続を切りはずした。同軸導体表面上にある節点Eについては、Vz(-Ez)=0となるように、節点Eを接地した。同軸導体表面上にある節点Fについては、Ix(-Ez)=0となるように、隣接する節点Eとの接続を切り離した。接地面は完全導体として境界条件を設定した。すなわち、接地面をD-F-E面に対応させ、接地面上の節点DではVx(Ex)=0となるように節点Dを接地し、節点EではVz(-Ez)=0となるように節点Eを接地し、節点FではIx(-Ez)=0かつIz(Ex)=0となるように隣接する節点Dおよび節点Eとの接続を切り離した。そして、同軸円筒導体の一端の中心導体とタンクとの間に、ステップ波電圧を印加したのに対応させたTEMモード電界を入力した。

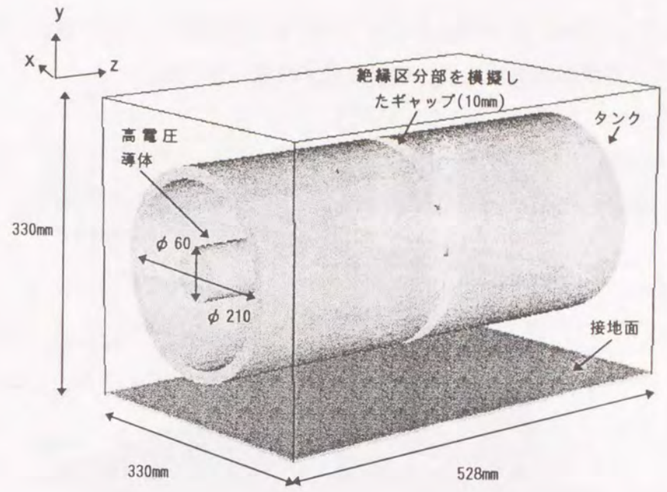


図6.15 解析モデル

6.4.3 解析結果

図6.16は、ステップ波電圧が絶縁区分部に到達する前の、y-z断面内での電界分布を示す。電界は、タンク内部のみに存在し、タンク外部には発生していない。図6.17はステップ波電圧が絶縁区分部を通過した後の、y-z断面内での電界分布を示す。図6.17から、ステップ波電圧が絶縁区分部へ到達すると、タンク内部の電界が、絶縁区分部を通してタンク外側の地系へ伝搬していることが分かる。図6.18は図6.17の絶縁区分のタンク外側の電界の様子を拡大して示す。図6.18から、接地系へ伝搬したサージによるタンク外側表面の電界は、絶縁区分を挟んでお互いに逆方向になることがわかる。これは、(6.1)式と(6.2)式の電圧透過係数の極性が逆になっていることに対応している。(6.1)式の透過係数が負になっていることに対応して、絶縁区分部から接地系へ漏れ出して電圧印加側へ向かって伝搬する電圧による電界はタンクの内側と外側とで逆向きになっている。図6.19は、解析によって得られた電界を積分して、各時刻において、電圧印加側および負荷側タンクの電位を計算した結果を示す。電圧印加側のタンクおよび負荷側のタンクの電位は、極性は逆であるが、その大きさはどちらも印加電圧の45%であった。この解析モデルの構成においては、図6.14において、$Z_1=Z_3=60\ln(210/60)=75\Omega$、

$Z_2=Z_4=60\cosh^{-1}[167/(220/2)]=59\,\Omega$ としたことに対応する[9)10)]。この場合、$T_{21}=-0.44$、$T_{41}=0.44$ となり、空間回路網法による解析結果とほぼ一致する。

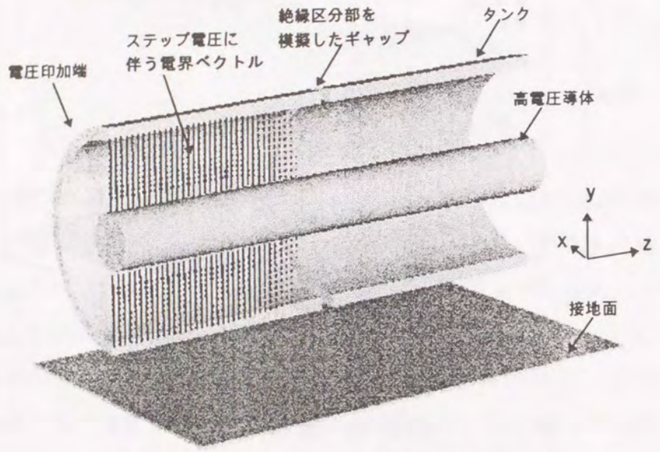


図 6.16　y−z 断面上の電界分布の解析例
（印加ステップ波電圧が絶縁区分部に到達する前）

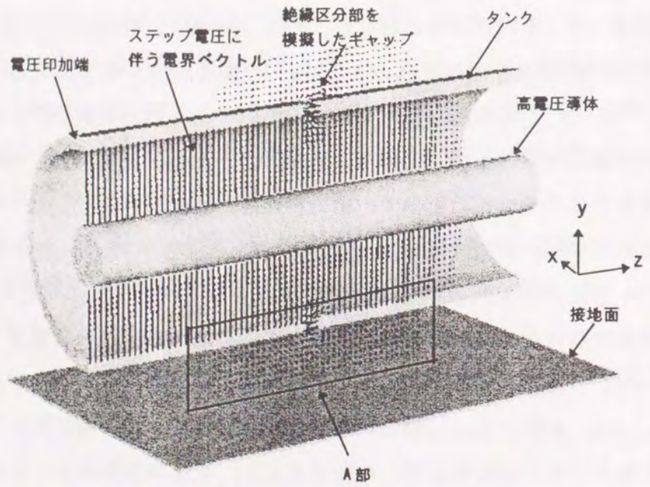


図 6.17　y−z 断面上の電界分布の解析例
（印加ステップ波電圧が絶縁区分部を通過した後）

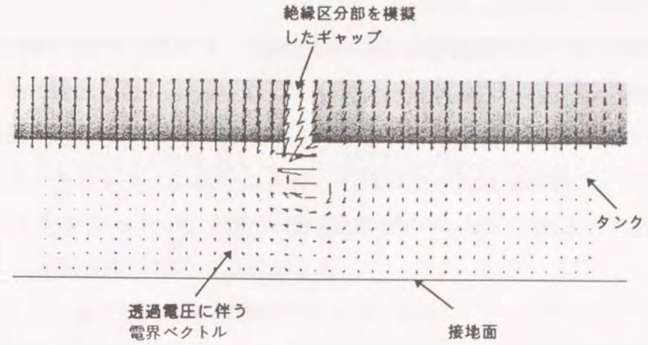


図 6.18　電界分布の解析例
（図 6.17 の A 部の拡大図）

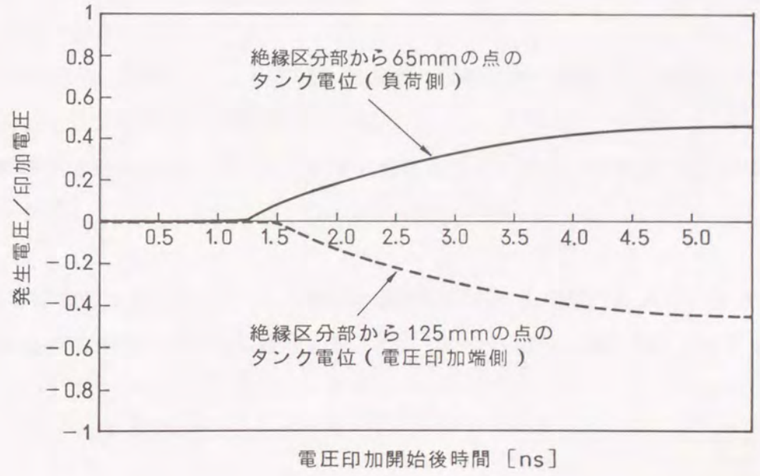


図 6.19　タンク電位の解析例
（空間回路網法による解析結果）

これらの結果は、本解析コードをGISにおける高周波サージの接地系への伝搬現象の解析に適用できることを示している。

空間回路網法を用いた解析結果からも分かる様に、GISタンク内の高周波サージはGISタンクの絶縁区分部を通して接地系へ伝搬する。ブッシング部においても、同様の機構で高周波サージが接地系へ伝搬するものと考えられる。絶縁区分部がタンクの円周方向全周に渡って完全に短絡接続されていれば、絶縁区分部へステップ波が到達する以前の様子を示す図6.17と同様にタンク外部へは電界は伝搬しないものと考えられる。

6.5 まとめ

本章では、過渡電磁界解析コードを開発して、本解析手法がGISタンク内部でのサージ伝搬現象の解析や、GISタンク内部から接地系への高周波サージの伝搬現象を解析した。解析結果を実測結果と比較することによって、以下のことを明らかにした。

(1)開発した解析コードは、絶縁スペーサを有するGISタンク内部における高周波サージの伝搬現象の解析に適用できる。
(2)GISタンク内部を伝搬する高周波サージは、絶縁スペーサ等の誘電体によって負反射波を生じる。
(3)負反射波の様相は、誘電体の形状の影響を受ける。
(4)開発した解析コードは、T字分岐部の様に分岐を有するGIS内部における高周波サージ伝搬現象の解析に適用できる。
(5)開発した解析コードは、GISタンク内部からタンク外部の接地系への高周波サージ伝搬現象の解析にも適用できる。
(6)GISタンク内部で発生した高周波サージは、GISタンクの絶縁区分部を通して接地系へ伝搬する。
(7)GISタンク内部からタンク外部へ伝搬する高周波サージ電圧の極性は、 絶縁区分部をはさんで互いに逆極性となる。
(8)絶縁区分部が円周方向全周に渡って短絡されていれば、高周波サージは接地系へ伝搬しない。

本章で作成した解析コードは、部分放電に起因する高周波パルスの伝搬現象等のGISの他の高周波現象の解析にも適用することができる汎用性の高いものと考えられる。

第6章　参考文献

1)加藤、岡部、山田、澤田、財満：「鉄塔サージ特性の電磁界解析」、
放電・高電圧合同研究会資料、ED-92-90　HV-92-28、1992

2)加藤、星野、望月、財満：「モーメント法による巻線のサージ伝搬特性の解析」、
静止器・回転器合同研究会資料、SA-93-16　RM-93-54、1993

3)「電磁波問題の基礎解法」、電気情報通信学会、1987

4)吉田・深井・福岡："電磁界の節点方程式による過渡解析"、電子通信学会
論文誌、80/9, Vol. J63-B, No. 9, p. p. 876-883, 1980

5)S. Koike, N. Yoshida, I. Fukai : "Transient Analysis of Microstrip Side-Coupled Filter in Three-Dimensional Shape", Trans. of IECE of Japan, Vol. E 69, No. 11, p. p. 1199-1205, November, 1986

6)K. Nojima, H. Murase, I. Ohshima, T. Kawamura :
"Countermeasures against Very Fast Transient Overvoltages", Japan-U. S. seminar on Electromagnetic Field Effects Caused by High Voltage Systems, Sapporo, 3-4, June 1994

7)Y. Ogawa、T. Mizumo, Y. Miyazaki, K. Nojima, H. Murase, Sakakibara : " Investigation of PD Pulse Traveling Characteristics In GIS ", IEEE Transaction on Power Systems
に掲載予定

8) Working Group 33/13-09 : "Very Fast Transient Phenomena Associated with Gas Insulated Substations", Cigre 1988 Session, 33-13, 1988

9)E. P. Dick, N. Fujimoto, G. L. Ford, S. Harvey : "Transient Potential Rise in Gas Insulated Substation - Problem Identification and Mitigation", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, No. 10, p. p. 3603-3609, October 1982

10)J. Meppelink, K. Diederich, K. Feser, W. Pfaff : "Very Fast Transients in GIS", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 4, No. 1, p. p. 223-233, January 1989

第7章　低電圧装置への誘導障害の抑制法

7.1　一般的考え方

一般に、誘導障害の抑制法は、その適用箇所によって次の3種類に大別される[1]。

(1) 発生源での抑制法

すでに述べた様に、GIS の接地系の高周波サージは、GIS の高電圧回路に発生した高周波サージが接地系へ伝搬することによって生じる。従って、高電圧回路の高周波サージそのものを低減すれば、接地系の高周波サージも抑制されることが多い。開閉装置の電極間に抵抗を挿入したり、高電圧回路にコンデンサと抵抗からなるサージ抑制装置を取り付けるのもそのための方法である。しかし、一般に高電圧回路に取り付ける抵抗やコンデンサは、高い耐電圧値や商用周波数電圧に対する長時間の信頼性が必要となり、簡単には実施し難い。

(2) 伝搬路での抑制法

発生源から低電圧機器へ至る伝搬路で高周波サージを抑制する方法である。GIS においては、タンクの内部で発生した高周波サージが接地系を経て低電圧機器の電源ラインや信号ラインへ伝搬するのを防ぐ方法に対応する。雷に起因する接地系のサージの様に、発生場所が限定される場合には、低電圧機器をこの場所から離して設置することもこの方法に対応する。すでに述べたように、開閉装置の動作によって生じる 10MHz を越す高周波サージは、一度 GIS タンクの外部へ伝搬するとこれによる接地電位振動の抑制が難しく、また、低電圧機器への誘導レベルも大きい。従って、GIS タンク内部から接地系への伝搬を抑制することがポイントとなる。

(3) 低電圧機器での抑制法

低電圧機器に到達後、電源ラインや信号ラインにサージ吸収素子やフィルタ等を取り付ける方法である。接地系の高周波サージの周波数が数 100kHz 以下で低い場合には比較的容易に効果を選られるが、10MHz を越すような高周波サージに対しては一般に効果を得難い。

7.2 GISでの抑制法

GISの接地系に発生する高周波サージの抑制法を考える場合、GISタンク内部から接地系への高周波サージの伝搬を抑制することがポイントとなる。このためには、GISタンクの絶縁フランジ部やケーブルヘッド部の様な絶縁区分部を高周波サージに対して低インピーダンスで短絡するのが効果的だと考えられる[2)3)4)5)]。具体的には図7.1(a)に示す様に絶縁区分部を低インダクタンスの導体で直接接続するか、あるいは図7.1(b)に示す様に対象とする高周波サージの周波数域でインピーダンスが十分に低くなる静電容量を有するコンデンサを介して結合すればよい[6)]。

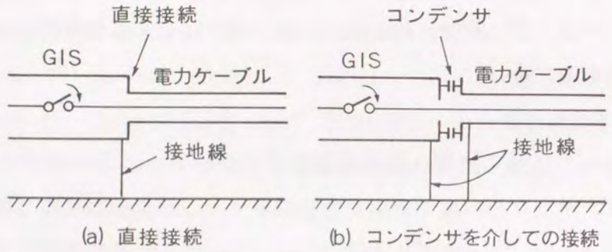


図7.1 絶縁区分部の結合

7.3 抑制効果の解析

7.3.1 解析法

抑制法の効果を、6章で作成した、空間回路網法による電磁界解析プログラムを用いて解析した。解析モデルとしては、図6.15のモデルを用いた[7)]。

7.3.2 コンデンサ結合の効果

絶縁区分部を模擬したギャップに何も充填しない状態で、モデルの一端からステップ波電圧を印加した場合の電界分布の解析結果の一例を図7.2に示す。この場合に

は、ギャップ部においては、リング状のタンク断面どおしが互いに向かい合い、2pFの静電容量を構成している。図7.2は、電圧印加開始後2nsにおける、同軸円筒導体の中心軸を通り接地面に垂直な断面上の電界分布を示す。同図中の矢印の長さは電界の大きさを示し、矢印の方向は電界の方向を示している。サージ電圧に伴う電界が絶縁区分部を通して接地系へ伝搬しているのが分かる。絶縁区分部に比誘電率50の媒質を充填してコンデンサを形成させた場合の解析結果を図7.3に示す。この場合のギャップ部の静電容量は100pFである。図7.3はステップ波電圧印加後の時刻が図7.2と同じである。絶縁区分部から接地系へサージの伝搬に伴う電界の広がりが図7.2のそれよりも遅くなっていることが分かる。電界分布の解析結果から、絶縁区分部への誘電体の充填の有る場合と無い場合とについてタンク電位の時間変化を解析した。結果を図7.4に示す。誘電体を充填して絶縁区分部の静電容量を増加させると、タンク電位の上昇峻度が小さくなることがわかる。

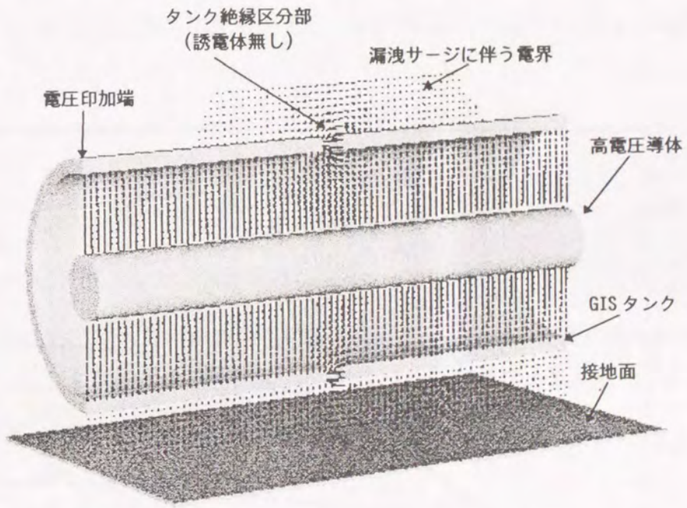


図7.2 y−z断面上の電界分布
(電圧印加後2ns，絶縁区分部に何も充填しない場合)

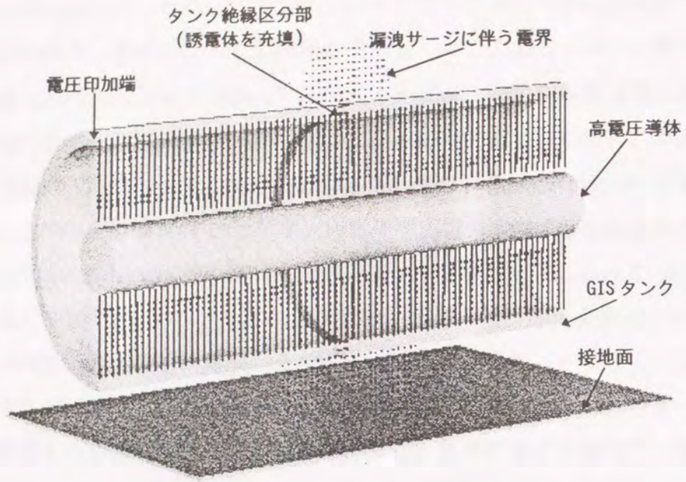


図7.3　y－z断面上の電界分布
（電圧印加後2ns，絶縁区分部に誘電体を充填した場合）

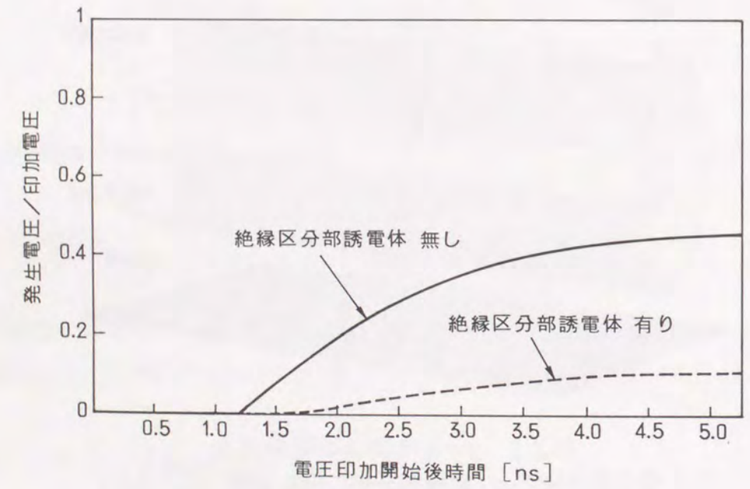
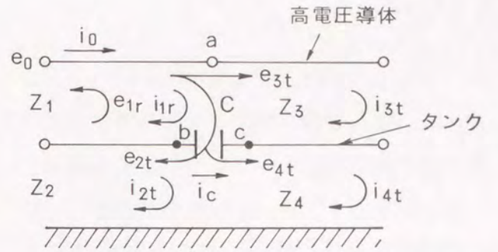


図7.4　タンク電位の時間変化
（絶縁区分部の負荷側タンク）



C：絶縁区分されたタンク間の静電容量

Z_1：高圧導体－タンク間の特性インピーダンス
Z_2：タンク－接地面間の特性インピーダンス
Z_3：高電圧導体－タンク間の特性インピーダンス
Z_4：タンク－接地面間の特性インピーダンス
e_0：印加ステップ波電圧
i_0：e_0に伴う電流
e_{1r}：タンク内部における絶縁区分からの反射波
i_{1r}：e_{1r}に伴う電流
e_{2t}：Z_2のタンク－接地面間への透過電圧
i_{2t}：e_{2t}に伴う電流
e_{3t}：Z_3の高電圧導体－タンク間への透過電圧
i_{3t}：e_{3t}に伴う電流
e_{4t}：Z_4のタンク－接地面間への透過電圧
i_{4t}：e_{4t}に伴う電流

図7.5　絶縁区分部の等価回路

図6.15のモデルにおける絶縁区分部の等価回路は、絶縁区分部のタンク間の静電容量Cを考慮して図7.5の様に考えることができる。図7.5中の高電圧導体上のa点，およびタンク絶縁区分部のb点，c点それぞれにおいて、次の電圧および電流の連続式が成り立つ。

$$e_0 + e_{1r} + e_{2t} = e_{3t} + e_{4t} \quad \ldots a\text{点}$$
$$-i_0 + i_{1r} - i_{2t} = i_c \quad \ldots\ldots\ldots b\text{点}$$
$$-i_{3t} + i_{4t} = i_c \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots c\text{点}$$
$$i_0 - i_{1r} = i_{3t} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots a\text{点}$$
$$i_c = sC(e_{2t} - e_{4t}) \ldots\ldots\ldots\ldots b,c\text{点}$$

特性インピーダンスがZ_1の線路から絶縁区分部タンク間への電圧の透過係数T_V、特性インピーダンスZ_2の線路への透過係数T_{21}、特性インピーダンスZ_3の線路への透過係数Z_{31}、および特性インピーダンスZ_4の線路への透過係数T_{41}は、次の様になる。

$$T_V = \frac{2 \cdot \dfrac{(Z_2+Z_4)}{1+sC(Z_2+Z_4)}}{Z_1+Z_3+\dfrac{(Z_2+Z_4)}{1+sC(Z_2+Z_4)}} = \frac{\dfrac{2}{(Z_1+Z_3)C}}{\dfrac{Z_1+Z_2+Z_3+Z_4}{(Z_1+Z_3)(Z_2+Z_4)C}+s} \quad \cdots (7.1)$$

$$T_{21} = \frac{-2 \cdot \dfrac{(Z_2+Z_4)}{1+sC(Z_2+Z_4)}}{Z_1+Z_3+\dfrac{(Z_2+Z_4)}{1+sC(Z_2+Z_4)}} \cdot \frac{Z_2}{Z_2+Z_4} = \frac{\dfrac{-2 \cdot Z_2}{(Z_1+Z_3)(Z_2+Z_4)C}}{\dfrac{Z_1+Z_2+Z_3+Z_4}{(Z_1+Z_3)(Z_2+Z_4)C}+s} \quad \cdots (7.2)$$

$$T_{31} = \frac{2\cdot Z_3}{Z_1 + Z_3 + \dfrac{Z_2 + Z_4}{1 + sC(Z_2 + Z_4)}} = \frac{2\cdot Z_3}{Z_1 + Z_3} \cdot \frac{\{\dfrac{1}{(Z_2 + Z_4)C} + s\}}{\dfrac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4}{(Z_1 + Z_3)(Z_2 + Z_4)C} + s} \quad \cdots (7.3)$$

$$T_{41} = \frac{2\cdot \dfrac{(Z_2 + Z_4)}{1 + sC(Z_2 + Z_4)}}{Z_1 + Z_3 + \dfrac{(Z_2 + Z_4)}{1 + sC(Z_2 + Z_4)}} \cdot \frac{Z_4}{Z_2 + Z_4} = \frac{\dfrac{2\cdot Z_4}{(Z_1 + Z_3)(Z_2 + Z_4)C}}{\dfrac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4}{(Z_1 + Z_3)(Z_2 + Z_4)C} + s} \quad \cdots (7.4)$$

印加電圧がステップ波の場合には、各線路への透過電圧は次の様になる。(7.1)式から、絶縁フランジ間電圧 V_g は、次の様になる。

$$V_g = T_V \cdot \frac{1}{s} \quad \rightarrow \quad \frac{2\cdot(Z_2 + Z_4)}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4}\left(\frac{1}{s} - \frac{1}{\dfrac{1}{\tau} + s}\right)$$

ただし、

$$\tau = \frac{(Z_1 + Z_3)(Z_2 + Z_4)C}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4}$$

e_{2t} は、次のようになる。

$$e_{2t} = T_{21} \cdot \frac{1}{s} \quad \rightarrow \quad \frac{-2Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4}\left(\frac{1}{s} - \frac{1}{\dfrac{1}{\tau} + s}\right)$$

e_{3t} は、次の様になる。

$$e_{3t} = T_{31} \cdot \frac{1}{s} \rightarrow \frac{2Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4} \cdot \frac{1}{s} + \frac{2Z_3(Z_2 + Z_4)}{(Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4)(Z_1 + Z_3)} \cdot \frac{1}{\dfrac{1}{\tau} + s}$$

e_{4t} は、次の様になる。

$$e_{4t} = T_{41} \cdot \frac{1}{s} \quad \rightarrow \quad \frac{2Z_4}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4}\left(\frac{1}{s} - \frac{1}{\dfrac{1}{\tau} + s}\right)$$

上記の結果において各透過係数の周波数特性を求めるために s=j ωとすると、GIS タンク内部からタンク外部の接地系への電圧の移行係数は、

$$\left|T_{31}\right| = \left|T_{41}\right| = \frac{2Z_4}{(Z_1 + Z_3)(Z_2 + Z_4)C} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left\{\dfrac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4}{(Z_1 + Z_3)(Z_2 + Z_4)C}\right\}^2 + \omega^2}}$$

となる。Z_1=Z_3=75 Ω、Z_2=Z_4=59 Ωとしたとき、C=2pF の場合と C=100pF の場合の$|T_{41}|$の周波数特性は図 7.6 の様になる。図 7.6 から、高周波成分に対しては、静電容量によって絶縁区分部のインピーダンスが低下して短絡状態に近づき、GIS タンク内部から接地系への透過係数が小さくなることが分かる。この効果は静電容量の値が大きいほど高いことも分かる。図 7.4 において、絶縁区分部に誘電体を充填することによって立ち上がり峻度が小さくなったのは、この効果によるものと考えられる。

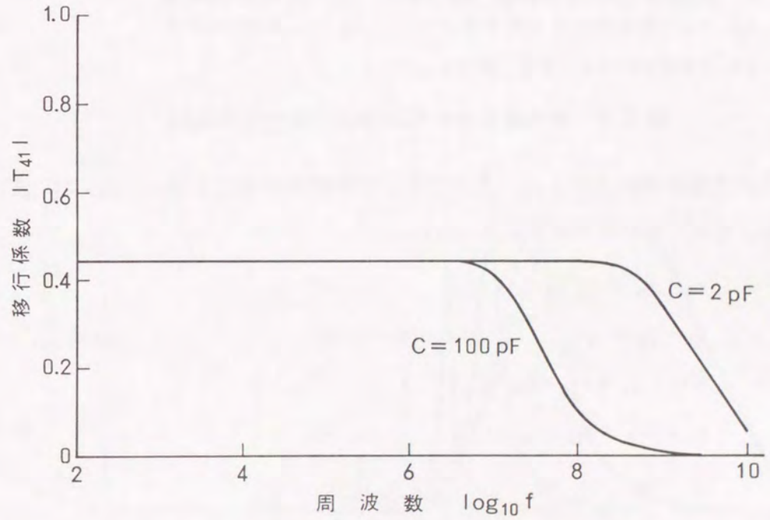
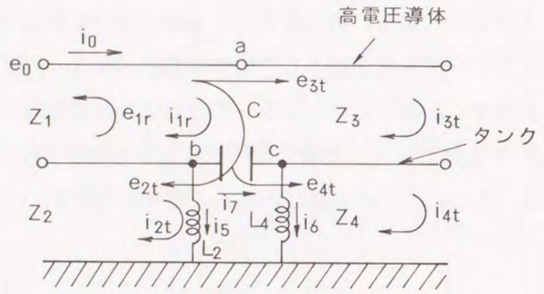


図 7.6 接地系への電圧透過係数
（図 7.5 において、$Z_1 = Z_3 = 75\,\Omega$,
$Z_2 = Z_4 = 59\,\Omega$ の場合）

通常、GIS タンクは、接地線を用いて接地される。接地線は通常 1～2m と短いため、100MHz 程度までの高周波サージに対しては集中定数のインダクタンスとして摸擬することができる。図 7.5 と同様にして、接地線を考慮した場合の等価回路は図 7.7 の様になるものと考えられる。



C：絶縁区分されたタンク間の静電容量　　i_5：L_2 を流れる電流
L_2，L_4：接地線のインダクタンス　　i_6：L_4 を流れる電流
（＊ その他のパラメータは、図7.5と同じ）

図 7.7　接地線を有する絶縁区分部の等価回路

図 7.7 の高電圧導体上の a 点、およびタンク絶縁区分部の b 点、c 点において、次の電圧および電流の連続式が成り立つ。

$$e_0 + e_{1r} + e_{2t} = e_{3t} + e_{4t} \quad \cdots\cdots \quad a点$$

$$i_0 - i_{t1} = i_{3t} \quad \cdots\cdots \quad a点$$

$$-i_0 + i_{1r} = i_{2t} + i_{5t} + i_{7t} \quad \cdots\cdots \quad b点$$

$$i_7 = -i_{3t} + i_{4t} + i_{6t} \quad \cdots\cdots \quad c点$$

$$i_0 = \frac{e_0}{Z_1}, i_{1r} = \frac{e_{1r}}{Z_1}, i_{2t} = \frac{e_{2t}}{Z_2}, i_{3t} = \frac{e_{3t}}{Z_3}$$

$$i_{4t} = \frac{e_{4t}}{Z_4}, i_5 = \frac{e_{2t}}{sL_2}, i_6 = \frac{e_{4t}}{sL_4}, i_7 = sC(e_{2t} - e_{4t})$$

これらの式から、GIS タンク内部から、絶縁区分部の負荷側タンク外部への電圧透過係数 T_{41} は次の様になる。

$$T_{41} = \frac{2L_4Z_4(L_2s + Z_2)}{[Z_2Z_4(Z_1 + Z_3) + \{L_2(Z_1Z_4 + Z_2Z_4 + Z_3Z_4) + L_4(Z_1Z_2 + Z_2Z_3 + Z_2Z_4)\}s + \{L_2L_4(Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4) + C(Z_1Z_2Z_4 + Z_2Z_3Z_4)(L_2 + L_4)\}s^2 + CL_2L_4(Z_1Z_2 + Z_2Z_3 + Z_1Z_4 + Z_2Z_4)s^3]}$$

この式において、s=j ω、Z_1=Z_3=75 Ω、Z_2=Z_4=150 Ω、L_2=L_4=1 μ H として、絶縁区分部のタンク間の静電容量 C を変化させた場合の電圧透過係数を計算すると、図 7.8 の様になる。絶縁フランジ間の静電容量が増えるにしたがって、GIS タンク外部へ伝搬する電圧が小さくなることがわかる。静電容量 C が数 10nF 以上あれば、10MHz を超す高周波サージはほとんどタンク外部へ伝搬しなくなるものと期待できる。

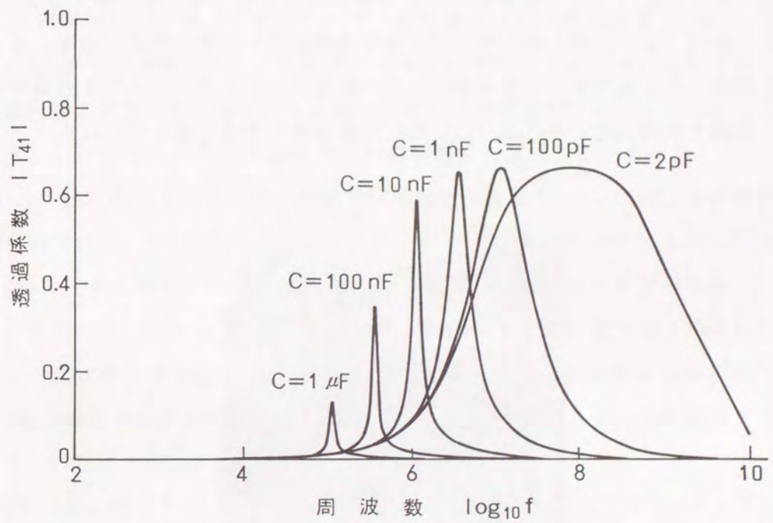


図7.8　接地系への電圧透過係数
（図7.7において、$Z_1 = Z_3 = 75\Omega$，
$Z_2 = Z_4 = 150\Omega$，$L_2 = L_4 = 1\mu H$の場合）

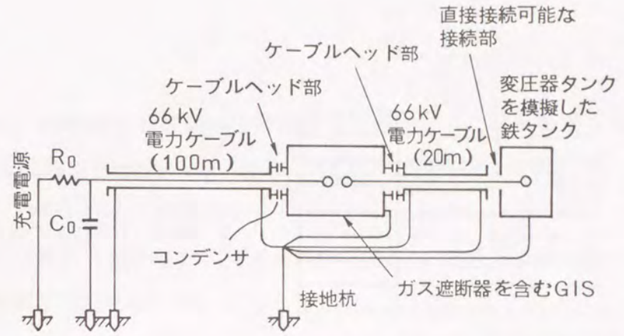
7.4　抑制効果の実測

7.4.1　実験方法

7.2節で述べた誘導障害の抑制方法の効果を確かめるために5章で述べた66kVの実規模GIS-ケーブル系実験装置を用いて実験を行った[6]。5章に述べた実験装置の構成のまま、すなわち、ケーブルとGISとの接続部がブッシングであっては実験が困難である。その理由は、GISタンクとケーブルシースとをインダクタンスの小さなリード線で直接接続することが困難であるし、またコンデンサを取り付ける時のインダクタンスを小さくするのも困難であるからである。この問題を解決するために、GISのブッシング装置のかわりに新たにケーブルヘッド部を製作した。そして、コンデンサをGISタンクと電力ケーブルシースとの間に円周状に20cm程度の短い距離で直接接続できるようにした。コンデンサを取り付けた時のケーブルヘッド部の様子を図7.9に示す。変圧器のブッシングと電力ケーブルとの接続部にも同様の問題がある。そこで変圧器を模擬した鉄製のタンクを準備し、この鉄製タンクと電力ケーブル金属シースとを短い距離で直接接続できるようにした。実験装置の構成を図7.10に示す。



図7.9　ケーブルヘッド部



R0＝100kΩ, C0＝0.85μF

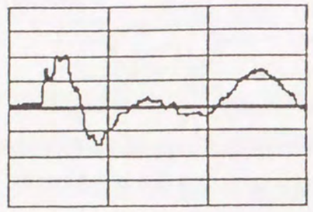
図7.10　実験装置の構成

7.4.2　測定結果および検討

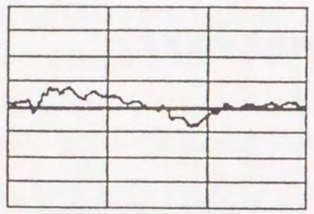
GISの接地線だけではなく電力ケーブルや模擬変圧器の接地線も一つの接地杭へ接続した。GISタンクと電力ケーブル金属シースとの間にコンデンサを取り付けないで且つ模擬変圧器タンクと電力ケーブル金属シースとの間を直接接地しない状態でガス遮断器を投入し、接地杭の遠方基準接地点に対する電位を測定した結果を図7.11（a）に示す。図7.11（a）に示した接地杭の過渡電位振動波の初期部分には10MHzを越す周波数成分が見られており、GIS内部からこの周波数のサージが漏れ出していることが分かる。次に、GISタンクと電力ケーブルの接続部に0.06μFのコンデンサを円周配置し、変圧器のタンクと電力ケーブルシースとは直接接続しない状態でガス遮断器を投入した。接地杭の電位の測定波形を同様に図7.11（b）に示す。接地杭の過渡電位振動波形の初期部分には10MHz成分がまだ含まれており、GIS内部から接地系へこの周波数のサージがまだ漏れ出していることがわかる。

GISタンクと電力ケーブルとを接続するケーブルヘッドに0.06μFのコンデンサを円周配置し、同時に変圧器タンクと電力ケーブル金属シースとを直接接続した状態でガス遮断器を投入した。この時の接地杭の電位の測定波形を図7.11（c）に示す。このとき、接地杭の過渡電位振動波形には10MHz成分が見られなくなっており、GISタンク内部から接地系に10MHzを越す周波数のサージが漏れ出さなくなっていることがわかる。

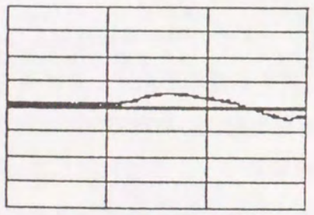
これらの実験結果から、7.2節の抑制方法が意図した効果を表わしていることがわかる。



(a) 接地杭の電位振動
縦軸：1 kV／div
横軸：0.82 μs／div



(b) 接地杭の電位振動
縦軸：1 kV／div
横軸：0.82 μs／div



(c) 接地杭の電位振動
縦軸：1 kV／div
横軸：0.82 μs／div

(a) GIS タンクと電力ケーブル金属シース：コンデンサ なし
変圧器タンクと電力ケーブル金属シース：直接接続しない

(b) GIS タンクと電力ケーブル金属シース：コンデンサ接続
変圧器タンクと電力ケーブル金属シース：直接接続しない

(c) GIS タンクと電力ケーブル金属シース：コンデンサ接続
変圧器タンクと電力ケーブル金属シース：直接接続

図 7.11　ガス遮断器投入時の接地杭の電位振動

7.5　まとめ

本章では、誘導障害の抑制法を検討するために行った解析結果と実規模実験装置を用いた実験結果について述べた。そして、以下のことを明らかにした。

(1) 誘導障害の抑制法は、発生源での抑制法、伝搬路での抑制法、低圧装置での抑制法に大別される。

(2) GIS に適用しやすいのは、発生源での抑制法と伝搬路での抑制法である。特に 10MHz を越す高周波サージによる誘導障害を抑制するためには、GIS タンク内部に発生した高周波サージがタンク外部へ伝搬するのを抑制することがポイントとなる。

(3) GIS-ケーブル系においては、GIS タンクの絶縁区分部や、電力ケーブルと GIS タンク等との接続部をコンデンサを介して高周波的に短絡したり、可能なら直接接続することによって、10MHz を越す高周波サージが接地系へ伝搬するのを防止することができる。

第７章　参考文献

1) 野嶋、大島：
“受変電設備とＥＭＩ／ＥＭＣ”, 電気学会誌, １１０巻, １１号, 平成２年, p.p. 931-938

2)M. Ishikawa, N. Oh-hashi, Y. Ogawa, M. Ikeda, H. Miyamoto, J. Shinagawa : “An Approach to the Suppression of Sheath Surge Induced by Switching Surges in a GIS/Power Cable Connection System”, IEEE PAS, Vol PAS-100, No. 2, p. p. 528-538, February 1981

3)A. Welsch : “Outcoupling and external phenomena of Very Fast Transients (VFT) in GIS”, 6th ISH, 49. 05, August 1989

4)N. Fujimoto, S. J. Croall, S. M. Foty : “Techniques for the Protection of Gas-Insulated Substation to Cable Interfaces”, IEEE Trans. on PWRD, Vol. 3, No. 4, p. p. 1650-1655, October 1988

5)W. Buesch, H. Stephanides, T. Heinemann : “Attenuation of Fast Transients in GIS Earthing System”, CIGRE 1988 Session, 23-10, August 1988

6) 野嶋、西脇、和田、柳父:
“ケーブル系GISの開閉サージによるエレクトロニクス機器への誘導障害”,
電気学会論文誌　B, １１１巻, ３号, p. p. 314-323, 平成３年

7)K. Nojima, H. Murase, I. Ohshima, T. Kawamura : “Countermeasures against Very Fast Transient Overvoltages”, Japan-U. S. seminar on Electromagnetic Field Effects Caused by High Voltage Systems, Sapporo, 3-4, June 1994

第８章　低電圧装置への誘導障害の実例と抑制方法の効果

8.1　まえがき

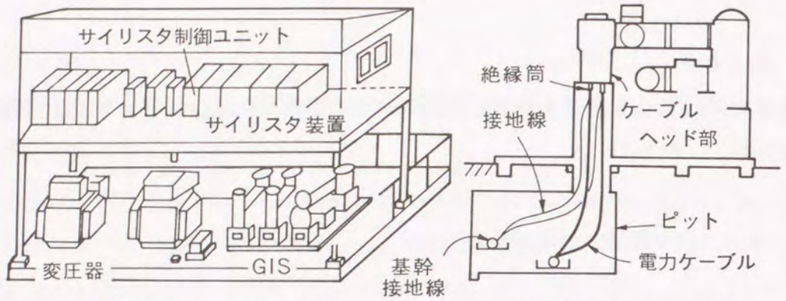
本章では、実 GIS 設備で経験した誘導障害の事例を紹介し、第７章で述べた抑制法の適用効果について述べる。

8.2　サイリスタ設備での障害事例

8.2.1　設備の構成

図 8.1(a)(b)に誘導障害を経験した機器の構成を示す[1)2)3)]。図 8.1(a)に示す様に 2 階建て建家の 1 階部分に 66kV の GIS と変電設備が設置されている。GIS は電力ケーブルによって給電され、GIS と変圧器との間も電力ケーブルによって接続されている。GIS はガス遮断器および断路器、その他によって構成されており、それ自体は絶縁区分部を有していない。GIS と電力ケーブルとは、図 8.1(b)の様に接続されている。変圧器と電力ケーブルとの接続も同様である。すなわち、電力ケーブルの金属シースは、GIS または変圧器との接続点において 5m 程度の接地線によって接地されており、GIS タンクや変圧器タンクと直接には接続されていない。

そのすぐ上の 2 階部分には、1 階の変圧器の 2 次側と接続されたサイリスタ機器が設置されている。変圧器の 2 次側電圧は 1300V である。サイリスタのゲート回路にはサイリスタの点弧制御のためのエレクトロニクス機器が接続されている。サイリスタ機器のすぐ近くに 66kV の高電圧機器が配置されている構成である。



(a) 建家内のレイアウト　　(b) GISと電力ケーブルとの接続部の構造

図8.1　設備の構成

8.2.2　サイリスタの誤動作

このような構成の設備において、1階のGISのガス遮断器を投入動作させた時に2階のサイリスタが誤動作するという現象が発生した。サイリスタのアノード・カソード間電圧の測定を行った結果、この電圧の大きさおよびdV/dtはサイリスタの誤点弧を生じない小さいものであることが分かった。また、サイリスタのアノード・カソードを変圧器の2次回路から切り離し、代わりに200Vの構内電源をアノード・カソードに接続した状態でもガス遮断器を投入動作させた時に誤点弧が発生した。さらに、この誤点弧現象はサイリスタにゲート信号を与える制御機器の電源を切った状態でも発生した。これらのことから、誤点弧は主回路サージが直接の原因ではなく、接地系からの誘導現象が原因であると判断された。

8.2.3　接地改良の効果

これまで、一般に接地系の高周波サージによる低電圧装置への影響を低減するためには、接地メッシュ等の強化を行い接地インピーダンスを下げるという方法が考えられてきた。この事例においても、誤点弧の原因が接地系のサージであることが予測されたため、図8.1(a)に示した設備の1階と2階の両者の床面に接地メッシュを敷設しこれを

多点接地することによって接地インピーダンスの低減を行った。しかし、誤点弧はこれだけではおさまらず、これまでとは違った視点からこの現象を調査し直すことが必要となった。

8.2.4　障害の原因の実測

(1)実験装置および方法

図5.1に示したのと同様の66kVGIS－ケーブル系を模擬した実験装置を用いて、接地系の高周波サージがサイリスタにおよぼす影響を調査した。誤点弧を生じたのと同じサイリスタ装置ユニットを準備し、GISの接地線をこのサイリスタ装置ユニットのフレームの一端に接続した。サイリスタ装置ユニットのフレームの他端は接地杭に接続した。図8.2にサイリスタ装置ユニットを接続した実験装置を示す。

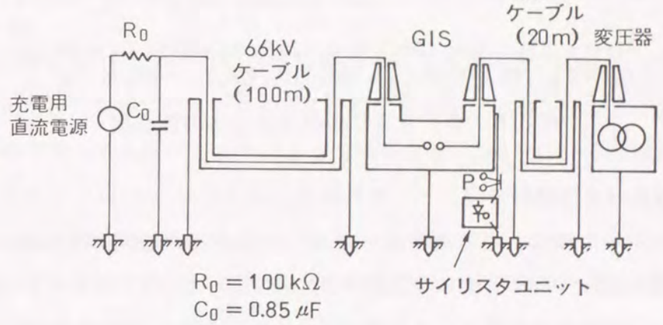
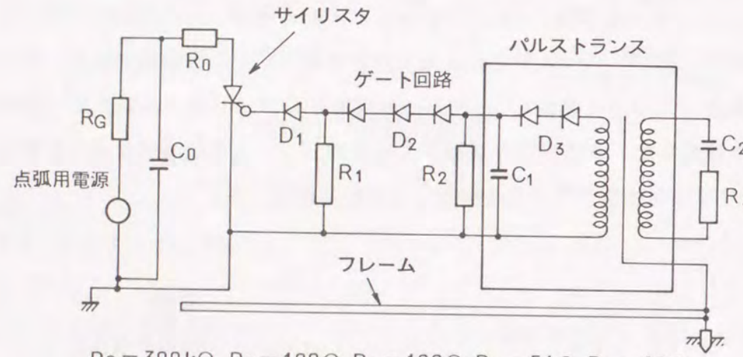


図8.2　実験装置の構成

図8.3にサイリスタ装置ユニットの回路を示す。サイリスタ素子の定格は4000V・2000Aである。サイリスタ素子のゲートとパルストランスの2次側との間にはダイオードを使用した回路が挿入され、サイリスタ素子のゲートからパルストランスへ向かう方向へは電流が流れないように意図されている。サイリスタ素子およびパルストランスは300mm×300mmの金属製のフレーム状に固定されている。このサイリスタ素子およびパルストランスはフレームとは絶縁されている。サイリスタのアノード・カソード間には点弧電

源として2μFのコンデンサC_0を接続し、これを直流電源を用いてDC2000Vに充電した。実験では、GISのガス遮断器を投入し、この時にGISの接地線に発生する高周波電流を図8.2に示したように、サイリスタ装置ユニットのフレームに流入させた。そして、ゲート回路への誘導電流とアノード・カソード間の電圧変化を観測した。電流の測定には高周波CTを用いた。電圧の測定には抵抗分圧器を用いた。電圧・電流の測定信号は光信号に変換して観測室まで伝送した。これによりノイズの影響のない測定を行うことができた。



$R_G = 300\,k\Omega$, $R_0 = 100\Omega$, $R_1 = 100\Omega$, $R_2 = 51\Omega$, $R_3 = 20\Omega$
$C_0 = 2\,\mu F$, $C_1 = 1\,\mu F$, $C_2 = 1\,\mu F$, D_1, D_2, D_3：ダイオード

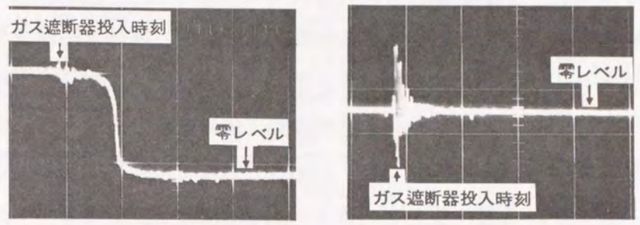
図8.3　サイリスタ装置ユニットの回路図

(2)実験結果および検討

5.3節で示した様に、ガス遮断器を投入した時にGISの接地線に流れる電流には500kHzの周波数成分と10MHzを越す周波数成分とが含まれている。これら2つの周波数成分を含むGISの接地線電流をサイリスタ装置ユニットのフレームに流入させた時の、サイリスタのアノード・カソード間電圧とゲート回路に誘導される電流とを測定した結果を図8.4に示す。サイリスタおよびパルストランスはこのフレームと絶縁されている。それにもかかわらず、図8.4(a)に見られる様にサイリスタは点弧している。このとき、ゲート回路には、図8.4(b)に見られるように周波数が10MHz程度で継続時間が1μs程度の電流が誘導されている。500kHz成分の電流はほとんど誘起されていない。

続いて図5.3に示した10MHz以上の周波数成分のみを含む電流をサイリスタ装置ユニットのフレームに流入させた。この時には、ゲート回路には図8.4(b)と同様の電流が流れ、図8.4(a)と同様の誤点弧が生じた。

これらのことから、ガス遮断器投入時に接地系に発生する10MHzを越す非常に高い周波数のサージによってサイリスタの誤点弧が生じていることが分かる。



縦軸：870 kV／div
横軸：2 μs／div
(a) アノード・カソード間電圧

縦軸：4 A／div
横軸：2 μs／div
(b) ゲート電流

図8.4　サイリスタの誤点弧

8.2.5　誘導に対するサイリスタの応答

(1)実験方法

実験には図8.3に示したサイリスタ装置ユニットを用いた。同軸ケーブルを直流電源によって充電しておき、これをサイリスタ装置ユニットのフレーム上に配置した絶縁被覆リード線を通して水銀スイッチによって短絡させ、50A～200Aの高周波電流を発生させた。充電電圧は1kV～10kVである。絶縁被覆リード線を使用しているため高周波電流が直接サイリスタ装置を流れることはない。

同軸ケーブルの長さとこれに直列に挿入するインダクタンスの値を変えることによって高周波電流の周波数を変化させた。

(2)実験結果および検討

絶縁被覆リード線を流れる電流の周波数が数100kHz程度のときはゲート回路には誘導電流はほとんど流れなかった。これに対して電流の周波数が10MHz程度に高くなると、ゲート回路に誘導電流が流れる様になった。この誘導ゲート電流があるレベル以上になると点弧が発生した。この時、図8.5(a), (b)に示す様に、ゲート回路誘導電圧の発生時間とアノード・カソード間電圧のターンオン時間には2μs程度の時間遅れがあり、しかもこのターンオンは誘導電流がなくなった後で発生した。このターンオンの様

相は素子の内部状態の変化に対応しているものと考えられるが、現段階ではそのメカニズムはよく分からない。

ゲート回路に発生する誘導電流の大きさの周波数依存性の測定結果を図8.6中に実線で示す。横軸は絶縁被覆リード線の電流の周波数であり、縦軸は絶縁被覆リード線の電流に対する誘導ゲート電流の割合を示す。図8.6には、各周波数で点弧を生じるのに必要な最小ゲート電流値の実測結果も破線で示す。誘導電流の大きさも点弧に必要な電流の大きさも、周波数とともに増加する。しかし、それらの増加率をみると、誘導電流の増加率の方が大きくなっている。このことは、10MHz以上の高周波サージが接地系に発生すると誘導電流が点弧に必要な電流値より大きくなってサイリスタの誤点弧が発生しやすくなることを示している。

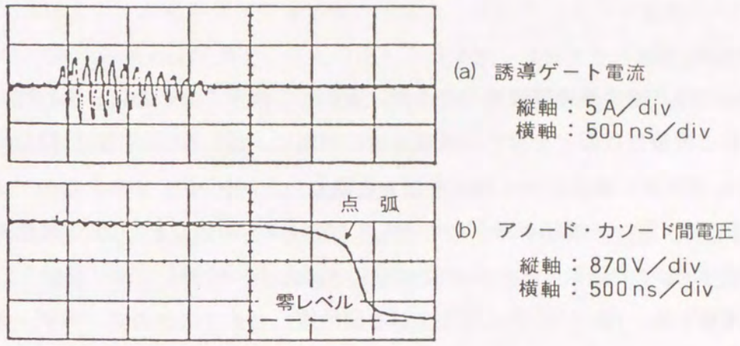


図 8.5　サイリスタのゲート回路の
誘導電流と誤点弧

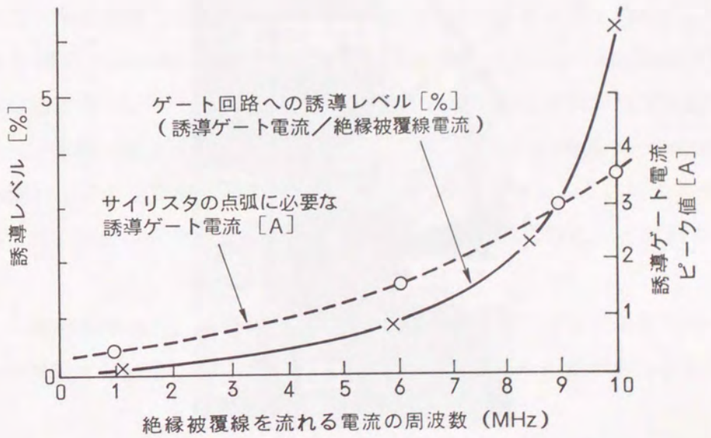


図 8.6　ゲート回路への誘導レベルと点弧に
必要な電流の周波数依存特性

8.2.6　抑制法の効果

(1)実験方法

実フィールドでの誘導障害をできるだけ近似して再現するために、図7.10のケーブルヘッド部と模擬変圧器とを有する試験装置の周囲に、図8.7に示す様に2階建ての実験装置を作り、2階部に実際のサイリスタ盤を設置した。2階のサイリスタ盤のアノード・カソード間には1階から同軸ケーブルを通してDC2000Vを印加した。1階で接地系に発生した高周波サージが2階のサイリスタ盤の周辺の接地系へ伝搬してゆく経路としては、建家の金属構造物、1階から2階に立ち上がる接地線、サイリスタのアノード・カソード間に電圧を与えるために1階から2階に立ち上がるケーブルのシースなどが考えられる。

GISタンクと電力ケーブルとの間、および電力ケーブル金属シースと変圧器タンクとの間の接続状態を変化させて、ガス遮断器を投入させ、2階のサイリスタのゲート回路に誘導される電流と、ゲート・アノード間電圧とを測定した。



図 8.7　２階建実験装置

(2)実験結果

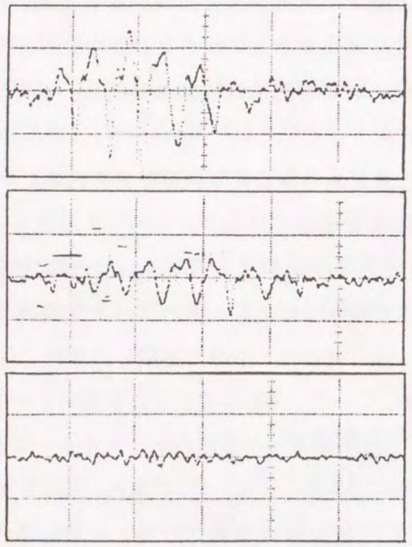
まず、GISタンクと電力ケーブル金属シースとの間にコンデンサを取り付けず、電力ケーブル金属シースと変圧器タンクとの間を直接接地しないでガス遮断器を投入した。この時、2階のサイリスタのゲート回路には10MHz程度の周波数の電流が誘導され、誤点弧が発生した。

次に、GISタンクと電力ケーブル金属シースとの間を円周配置したコンデンサで接続し同時に電力ケーブル金属シースと変圧器タンクとの間を直接接続して実験を行った。この時、2階のサイリスタのゲート回路には誘導電流は流れなくなり、誤点弧も発生しなくなった。

これらの実験結果は8.2節で述べた実フィールドでの誘導障害を再現し、7章で述べた誘導障害の抑制方法が効果的であることを示している。

GISタンクと電力ケーブル金属シースとを連結する経路のインダクタンスの誘導ゲート電流への影響を確認するため、このGISタンクと電力ケーブル金属シースとを(i)5mの接地線で別々に接地した場合、(ii)1mのリード線で連結した場合、(iii)円周状に配置したコンデンサで連結した場合について、2階のサイリスタ盤のゲート回路に誘導される電流を測定した。実験に際して変圧器タンクと電力ケーブルシースとは直接接続しておいた。測定結果を図8.8(a), (b), (c)に示す。(i)の場合、図8.8(a)に示したようにゲート回路には10MHz程度の周波数が3A程度誘導される。(ii)の場合にも、図8.8(b)に示したように、ゲート回路には10MHz程度の周波数の電流が1A程度誘導されており、1mのリード線の持つインダクタンスでも、10MHz以上の高周波サージがGIS内部から接地系へ漏れ出すのを抑制する上で十分でないことがわかる。これに対して、(iii)の場合には、図8.8(c)から分かる様にゲート回路の誘導電流はほとんど観測されなくなる。

これらの実験結果から、誘導障害を抑制するためにはGISタンクと電力ケーブル金属シースとを接続する経路のインダクタンスを十分小さくする必要があることが分かる。



(a) 誘導ゲート電流
（ケーブルヘッド部に
なにも取り付けない場合）
縦軸：2A／div
横軸：200ns／div

(b) 誘導ゲート電流
（ケーブルヘッド部に
1mのリード線を取り付けた場合）
縦軸：2A／div
横軸：200ns／div

(c) 誘導ゲート電流
（ケーブルヘッド部に
コンデンサを取り付けた場合）
縦軸：2A／div
横軸：200ns／div

図8.8　GISタンクと電力ケーブル金属シースとの間の
短絡線のインダクタンスの影響

8.3　他の設備での事例

8.3.1　275kV変電設備での事例

他の電力設備においても、8.2節で述べた事例と同様の誘導障害を経験した[4]。図8.9に示す275kVGISのガス遮断器を投入した時、GISに近接した制御盤の保護リレーが誤動作した。制御盤内制御線や信号線の電圧を測定した結果、10MHzを越す誘導サージが観測された。制御線や信号線にサージ吸収コンデンサを取り付けたが、誤動作はなくならなかった。

このGISと電力ケーブルとの接続部の構造を、図8.10に示す。2つのZ_n0サージアレスタがGISのタンクと電力ケーブルシースとの間に取り付けられている。GISタンクと電力ケーブル金属シースとの間は絶縁されている。このZ_n0はGISタンクと電力ケーブル金属シースとの間での絶縁破壊を防ぐ目的で取り付けられている。制限電圧V_{10kA}は約9kVであり、リード線の長さは、約250mmである。GISは地上5mのプラットホームに設置され、GISと電力ケーブルの接地線はこのプラットホームに接続されている。GISタンクは絶縁区分されておらず、多点接地方式が適用されている。

この事例の場合、接地系に発生する10MHzを超す高周波サージは、GISタンクと電力ケーブル金属シースとを金属板で直接接続することによって効果的に抑制できた。保護リレーも動作しなくなった。これは、Z_n0サージアレスタは絶縁区分でのフラッシオーバを抑制することはできるが、10MHzを超す高周波サージが接地系へ伝搬するのを防ぐことはできないことを示している。

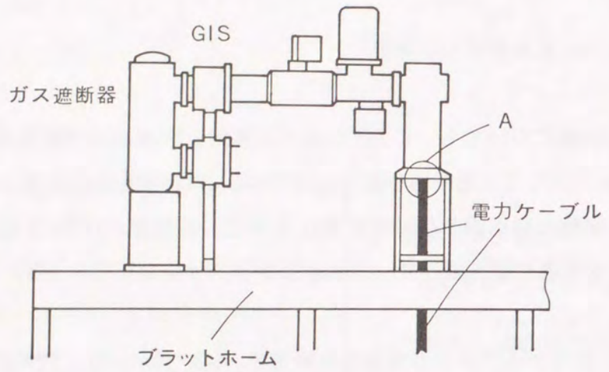


図8.9　275kV GISの構成

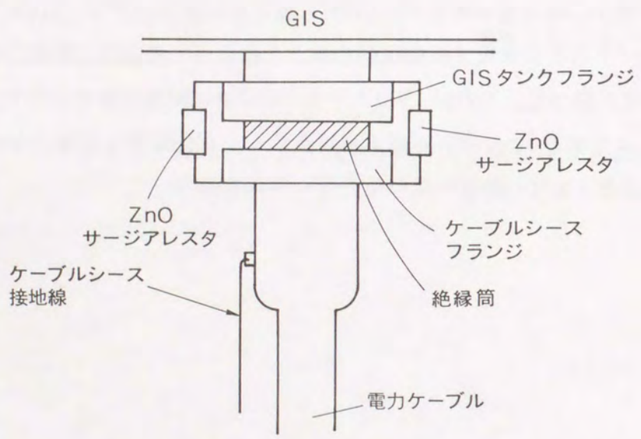


図8.10　図8.7のA部の詳細

8.3.2　33kV受電設備での事例[4)5)]

製鉄所の冷間圧延システムのサイクロコンバータが33kVGISと同一建家内に設置される設備が計画された。本設備の電力設備は、絶縁区分部を有しないGISと変圧器および電力ケーブルから構成されている。本設備では、あらかじめGISタンクと電力ケーブル金属シースとの間にコンデンサが取り付けられる構造が採用されており、電力ケーブル金属シースと変圧器タンクとは直接接続した。

コンデンサを取り付けない状態と、取り付けた状態でGISのガス遮断器を投入動作させ、GISタンクの電位を測定した。コンデンサを取り付けない状態での測定結果を図8.11(a)に示す。GISタンクの電位波形には10MHzを越す高周波成分が含まれている。GISタンクと電力ケーブル金属シースとの間にコンデンサを取り付けた場合の測定波形を図8.11(b)に示す。図8.11(b)には10MHzを越す周波数成分が含まれていない。本設備は、コンデンサを取り付けた状態で運転されており、誘導障害は発生していない。

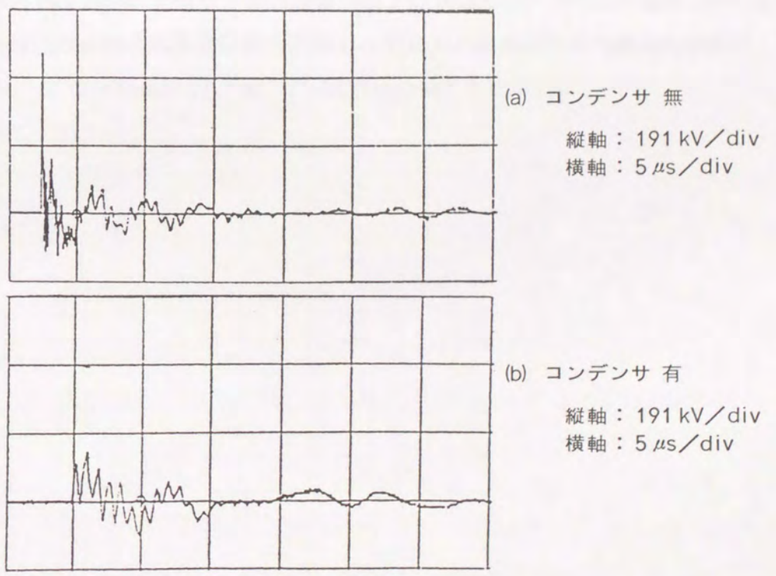


図8.11　GISタンクの電位
（実測波形）

8.4 まとめ

本章では、実際の GIS 設備で経験した誘導障害を紹介し、7 章の抑制法を適用した結果について述べた。そして、以下のことを明らかにした。

(1)GIS の開閉動作によって生じる 10MHz を越す高周波サージは、サイリスタ装置の様な電子機器の誘導障害の原因となりうる。

(2)絶縁区分部を有しない GIS からなる GIS－ケーブル系においては、GIS タンクと電力ケーブル金属シースとの間の絶縁区分部、および電力ケーブル金属シースと変圧器タンクとの間の絶縁区分部を、コンデンサを介して短絡するかまたは直接接続することによって、接地系へ 10MHz を越す高周波サージが伝搬するのを防止することができる。

(3)接地系へ 10MHz を越す高周波サージが伝搬するのを防止することによって、これに起因する低電圧装置の誘導障害を抑制することができる。

(4)10MHz を越す高周波サージに対しては、絶縁区分を短絡する経路に含れる 1 μ H 程度の小さなインダクタンス成分でも、短絡の効果を低減してしまう。

第 8 章　参考文献

1) 野嶋、西脇、和田、柳父:
"ケーブル系GISの開閉サージによるエレクトロニクス機器への誘導障害",
電気学会論文誌　B，１１１巻，３号，p.p.314-323，平成３年

2)K. Nojima, H. Murase, S.Nishiwaki, N. Tanabe, S. Yanabu : "Electromagnetic Interference with Control Equipment by GIS Switching Surges", Gaseous Dielectrics VI, Knoxville, p.p.467-473, 1990

3)野嶋、大島："受変電設備とEMI/EMC"、電気学会誌、110巻、11号、p.p.931-938, 平成２年

4)S. Nishiwaki, K. Nojima, S. Tatara, M. Kosakada, N. Tanabe, S. Yanabu : "Electromagnetic Interference with Electronic Apparatus by Switching Surges in GIS-Cable system", IEEE PWRD, Vol.10, No.2, p.p.739-746, April 1995

5) K. Nojima, K. Yokokura, S. Nishiwaki, I. Ohshima, S. Yanabu : "Electromagnetic Interference with Control Equipment by Switching Surges in GIS-Cable System", CIGRE Lausanne Symposium on EMC, 500-06, 1993

第9章　結論

本研究は、今後ガス絶縁開閉装置(Gas Insulated Switchgear (GIS))に近接して設置される電子機器が増えることを念頭におき、 GISにおける接地系の高周波サージの発生機構の把握と高周波サージに対する接地系の応答特性の解明、ならびに接地系の高周波サージによる低電圧装置への誘導特性の解明を行い、その抑制方法を確立して、GIS受変電設備全体の信頼性を向上すること目的として行った。この目的を達成するために、GISの接地系に発生する高周波サージに関する検討ならびにGISの接地系の高周波サージによる低電圧装置への誘導障害に関する検討を行った。

測定上の困難さから、GISの接地系に発生する高周波サージやそれによる低電圧装置への誘導障害について、実規模のGIS受変電設備を用いて実測研究した例はこれまでほとんどなかった。本研究では、実規模設備に適用可能な光伝送技術を応用した測定系を開発して実測研究を行った。また、これまで電力分野ではあまり行われていなかった電磁界の伝搬現象解析コードも作成し、接地系への高周波サージの伝搬現象の解析を試みた。本研究の成果は、実設備で発生した接地系サージによる低電圧装置への誘導障害の抑制対策として採用され実施された。以下に、代表的な結果を示す。

(1)第1章では、序論として、本研究の背景と、GISにおける高周波サージの特徴と問題点について総括した。

接地系の高周波サージの発生源として、雷サージ、開閉サージ、地絡サージがあることを示し、接地系における高周波サージによる障害発生の可能性のある場所としては、GISタンク、ケーブルヘッド部、低圧制御回路、監視装置、周辺に設置された低電圧装置があることを示した。

(2) 第2章では、GISの接地系における高周波サージに関する研究課題についてまとめた。

受変電設備全体の信頼性確保のためには、接地系に発生した高周波サージによる低電圧装置への誘導障害を抑制することが重要であること述べた。また、接地系の高周波サージやそれによる誘導障害の抑制法を検討するためには、実規模GIS受変電設備の接地系に発生する高周波サージやこれに対する接地系の応答を実測し明らかにする必要があることを示した。また、このためには、実設備での高周波電圧・電流測定に適用可能な測定系を開発することが必要であることも示した。

さらに、接地系に発生する高周波サージの内、特に避雷器が動作した時に発生する

高周波サージとGISの開閉装置を動作させた時に発生する高周波サージについて調査する必要があることを述べた。また、GISの開閉装置の動作に起因する10MHzを超す周波数の高いサージが誘導障害を起こしやすいことを述べ、それによる誘導障害の抑制法を明らかにすることの重要性を示した。

(3)3章では、高周波サージの測定上の問題点について述べ、電気／光変換測定系がGISの高周波サージ測定に有効であることを述べた。また、電気／光変換技術を応用して新しく開発した、高周波電流測定系、高周波主回路電圧測定系、および低圧系誘導サージ測定系の構成について述べた。これらの測定系の適用事例を紹介し、その有効性を示した。

(4)4章では、雷サージがGISへ送電線を伝搬してきて、避雷器が動作した場合に発生する接地系の高周波サージの実測結果について述べた。そして、以下のことを、明らかにした。

(Ⅰ)標準的な接地メッシュの最も簡易な等価過渡インピーダンスは、1μHのインダクタンスと3Ωの抵抗の直列回路で表わされる。

(Ⅱ)GISの接地メッシュに急峻波電流が流入したときのメッシュ電位のピーク値はおもに接地インピーダンスのインダクタンス成分によって決まる。

(Ⅲ)GISの接地メッシュに急峻波電流が流入したときの接地メッシュ電位の上昇する領域は、電流の流入点の近傍1.5m程度以内の範囲内である。

(Ⅳ)避雷器が動作した時GISタンクには、数MHzの基本周波数で継続時間5μs程度の高周波電圧が発生する。

(Ⅴ)避雷器の定格放電電流(10kA)が接地系へ流入したときのGISタンクの電位のピーク値は20kV程度であると考えられる。

(Ⅵ)避雷器動作時に接地系に大きな高周波サージが発生するのは避雷器近傍のみであると考えられる。

(5)5章では、66kVの実規模実験装置を用いてGIS-ケーブル系でGISのガス遮断器を投入動作した時に接地系に発生するサージの特徴を実測した結果について述べた。そして以下のことを明らかにした。

(Ⅰ)GIS－ケーブル系において、GISのガス遮断器を投入動作させたときに接地系に発生するサージは数100kHz程度の電力ケーブルを含めた回路全体で決まる周波数成分と、GIS部分での往復反射振動に起因して発生する10MHzを超す周波数成分とを

持つ。

(Ⅱ)数100kHzの周波数の高周波電流は、GISタンクや電力ケーブルシースが絶縁区分されている場所に近い接地線を通して接地杭や接地メッシュへ流入する。

(Ⅲ)接地系の高周波サージに含まれる10MHzを超す高周波成分は、近接するGISの開閉装置を動作させた場合に特徴的に発生する。

(Ⅳ)埋設接地メッシュは、数100kHz程度のサージに対しては接地電位振動の抑制効果を持つが、10MHzを超す高周波サージに対しては抑制効果を持たない。

(6)6章では、過渡電磁界解析コードを開発して、GISタンク内部でのサージ伝搬現象や、GISタンク内部から接地系への高周波サージの伝搬現象を解析し、以下のことを明らかにした。

(Ⅰ)開発した解析コードは、GISにおける高周波サージの伝搬現象の解析に適用できる。

(Ⅱ)GISタンク内部を伝搬する高周波サージは、スペーサ等の誘電体によって負反射波を生じる。

(Ⅲ)負反射波の様相は、スペーサ等の誘電体の形状の影響を受ける。

(Ⅳ)GISタンク内部で発生した高周波サージは、GISタンクの絶縁区分部から接地系へ伝搬する。

(Ⅴ)GISタンク内部から接地系へ伝搬したサージ電圧の極性は、絶縁区分部をはさんで互いに逆極性となる。

(Ⅵ)絶縁区分部を高周波成分に対して短絡すれば、高周波サージは接地系へ伝搬しない。

本章で作成した解析コードは、部分放電に起因する高周波パルスの伝搬現象等のGISの他の高周波現象の解析にも適用することができる汎用性の高いものである。

(7)7章では、誘導障害の抑制法を検討するために行った解析結果と実規模装置を用いた実験結果について述べた。そして、以下のことを明らかにした。

(Ⅰ)誘導障害の抑制に有効な方法は、発生源での抑制法、伝搬路での抑制法、低圧装置での抑制法に大別される。

(Ⅱ)GIS に適用しやすいのは、発生源での抑制法と伝搬路での抑制法である。特に

10MHz を越す高周波サージによる誘導障害を抑制するためには、GIS タンク内部に発生した高周波サージがタンク外部へ伝搬するのを防止することがポイントとなる。

(Ⅲ)GIS-ケーブル系においては、GIS タンクの絶縁区分部や、電力ケーブルと GIS タンク等との接続部をコンデンサを介して高周波的に短絡したり、可能なら直接接続することによって、10MHz を越す高周波サージが接地系へ伝搬するのを防止することができる。

(8)8 章では、実際の GIS 設備で経験した誘導障害の事例を紹介し、7 章の抑制法を適用した結果について述べた。そして、以下のことを明らかにした。

(Ⅰ)GIS の開閉動作によって生じる 10MHz を越す高周波サージは、電子機器の誘導障害の原因となりうる。

(Ⅱ)絶縁区分部を有しない GIS からなる GIS－ケーブル系においては、GIS タンクと電力ケーブル金属シースとの間の絶縁区分部、および電力ケーブル金属シースと変圧器タンクとの間の絶縁区分部を、コンデンサを介して高周波的に短絡するかまたは直接接続することによって、接地系へ 10MHz を越す高周波サージが伝搬するのを防止することができる。

(Ⅲ)接地系へ 10MHz を越す高周波サージが伝搬するのを防止することによって、これによる低電圧機器への誘導障害を抑制することができる。

(Ⅳ)10MHz を越す高周波サージに対しては、絶縁区分を短絡する経路に含れる 1 μ H 程度の小さなインダクタンス成分でも、短絡の効果を低減してしまう。

本研究で示した上記の誘導障害の抑制法は、実設備における誘導障害の防止対策として採用され期待通りの効果を示した。

今後、GIS受変電設備における低電圧装置への電子機器の適用はますます増えるものと考えられる。低電圧装置におけるEMC/EMI問題は、近年注目を集めており、GIS受変電設備全体の高度化と信頼性向上のため、今後さらに研究が進むものと考えられる。本論文が、GISを適用した受変電設備全体の高度化と信頼性向上の一助として役立てば幸甚である。

謝　辞

本論文を完遂するにあたり、終始御懇切なる御指導と御鞭撻を賜りました大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻　松浦虔士教授に衷心より感謝申し上げます。

本論文の作成にあたり、懇切なる御指導と御高配を賜った大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻　辻毅一郎教授、熊谷貞俊教授に深く感謝申し上げます。

本論文の作成にあたり、貴重な御助言を賜りました大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻　佐々木孝友教授、白藤純嗣教授、青木亮三教授、ならびに大阪大学レーザ核融合研究センター　山中龍彦教授、中塚正大教授に厚く御礼申し上げます。

本研究は、株式会社東芝　重電技術研究所において行われたものであり、本研究をまとめる機会を与えていただき、終始懇篤なる御指導、御鞭撻を賜りました、株式会社東芝　重電技術研究所　深倉壽一所長、電力技術開発部　池田久利部長、高電圧技術グループ　谷口安彦グループ長および府中工場スイッチギア部大島巌主幹に深く感謝申し上げます。

本研究の機会を与えていただくと共に、入社以来御指導、御鞭撻をいただきました株式会社東芝　技術企画部　柳父悟部長、重電技術研究所　電力技術開発部　西脇進主幹、高電圧技術グループ　村瀬洋主査に心より御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり、多大な御協力、御支援をいただいた株式会社東芝　重電技術研究所　電力技術開発部の皆様および高電圧技術グループの青柳浩邦主査をはじめとする方々に厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり、実変電所での実測の機会を与えていただくと同時に、貴重な御討論をいただいた、東京電力（株）ならびに中部電力（株）の方々に深く御礼申し上げます。

最後に、本研究は、以上に書ききれなかった多くの方々の御協力、御援助、御鞭撻の基で為し得たものであり、これらの方々に深く感謝の意を表します。

業績目録

1．主要論文

(1) K. Nojima, S. Nishiwaki, H. Okubo, S. Yanabu : “Measurement of surge current and voltage waveforms using optical-transmission techniques ”, IEE Proc. Vol.415-422, Pt.C, No.6, p.p.415-422, November 1987

(2) 野嶋健一、西脇　進、和田　哲、柳父　悟：
“ケーブル系GISの開閉サージによるエレクトロニクス機器への誘導障害”,
電気学会論文誌　B，１１１巻，３号，p.p.314-323，平成３年

(3) S. Karaki, T. Yamazaki, K. Nojima, T. Yokota, H. Murase, Takahashi, S. Kojima : “Transient Impedance of GIS Grounding Grid”, IEEE PWRD, Vol.10, No.2, p.p.723-731, April 1995

(4) S. Nishiwaki, K. Nojima, S. Tatara, M. Kosakada, N. Tanabe, Yanabu : “Electromagnetic Interference with Electronic Apparatus by Switching Surges in GIS-Cable system”, IEEE PWRD, Vol.10, No.2, p.p.739-746, April 1995

(5) Y. Ogawa, T. Mizumo, Y. Miyazaki, K. Nojima, H. Murase, Sakakibara : “Investigation of PD Pulse Traveling Characteristics In GIS “, IEEE Transaction on Power Systemsに掲載予定

2．国際会議

(1) K. Nojima, H. Murase, S. Nishiwaki, N. Tanabe, S. Yanabu :
“Electromagnetic Interference with Control Equipment by GIS Switching Surges”, Gaseous Dielectrics VI, Knoxville, p.p. 467-473, 1990

(2)T. Teranishi, K. Nojima, S. Motegi, H. Murase, I. Ohshima, Shidara, M. Akemoto, S. Takeda, K. Takata : “ 600kV Blumlein Modulator for an X-Band Klystron “, 8th IEEE Pulsed Power

Conference, p.p.315-318, SanDiego, June, 1991

(3) K. Nojima, H. Aoyagi, H. Murase, I. Ohshima : "Very Fast Transient Overvoltages in Gas Insulated Substation - Modeling of Three Phase Encapsulated Bus -", ISH Yokohama, 33.02, p.p. 323-326, August 1993

(4) K. Nojima, K. Yokokura, S. Nishiwaki, I. Ohshima, S. Yanabu : "Electromagnetic Interference with Control Equipment by Switching Surges in GIS-Cable System", CIGRE Lausanne Symposium on EMC, 500-06, 1993

(5) K. Nojima, H. Murase, I. Ohshima, T. Kawamura : "Countermeasures against Very Fast Transient Overvoltages", Japan-U.S. seminar on Electromagnetic Field Effects Caused by High Voltage Systems, Sapporo, 3-4, June 1994

(6) K. Nojima, H. Aoyagi, H. Murase, I. Ohshima : "Very Fast Transient Overvoltages in Gas Insulated Substation - Modeling of Three Phase Encapsulated Bus -", IEE of Japan Power & Energy, p.p. 245-250, 1993

(7) K. Nojima, I. Miwa, T. Yokota, H. Murase, I. Ohshima : "Analysis of Potential Distribution in Wound-type Resistor Unit", IEE of Japan Power & Energy, 126, p.p.149-154, 1994

(8) Y. Yamagata, K. Tanaka, Y. Terasawa, H. Aoyagi, K. Nojima, I. Hioki, H. Murase, T. Yokota :"Very Fast Transients in 1000kV HSGS Grounding Circuit", IEEE International Conference on Energy Management and Power Delivery, p.p.534-539, November 1995

3. 解説

(1)野嶋、大島：
"受変電設備とＥＭＩ／ＥＭＣ", 電気学会誌, １１０巻, １１号, p.p. 931-938, 平成２年

(2)野嶋：
"ノイズ対策への実戦的コーチ -シールディングテクニック-", 電気計算, Vol.53, No.16, p.p. 38-41, 12月, 1985

4. 電気学会全国大会等

(1) 小松、鹿野、野嶋、青柳、平田：
"ＧＩＳ変電所における補助接地メッシュとサージ電圧の関係", 昭和６１年電気学会全国大会、No.1138

(2) 野嶋、高橋、西脇、大久保、田辺、柳父：
"ＧＩＳ接地系に発生する過渡電圧", 平成元年電気学会全国大会、No.1145

(3) 野嶋、西脇、村瀬、田辺、柳父：
"高周波振動性サージ電圧に対する接地杭のインピーダンスの検討", 平成２年電気学会全国大会、No.1173

(4)野嶋、茂木、寺西、村瀬、大島：
"高周波方形波パルス発生回路の検討", 平成３年電気学会全国大会、No.１１７

(5)山崎、小林、佐々木、山本、田中、嶋津、野嶋、小坂田、阿部：
"ＬＩＷＬ低減550ｋＶガス絶縁開閉装置現地実用性能確認試験", 平成４年電気学会全国大会、No.1289

(6)野嶋、村瀬、大島：
"ＧＩＳ接地系への電磁界の伝搬現象の解析", 平成６年電気学会全国大会、No.1429

(7)山形、寺澤、日置、中嶋、溝口、野嶋、池田："1000kVHSGSの開発"、開閉保護・高電圧合同研究会、SP-94-88 HV-94-159、1994年11月

(8)小川、水野、宮崎、野嶋、若林、村瀬：
"GISにおける部分放電パルスの伝搬特性の検討－コーン型スペーサによる影響－"、平成７年電気学会電力・エネルギー部門大会、No.589

(9)小川、水野、宮崎、野嶋、榊原、谷口：
"GISにおける部分放電パルスの伝播特性の検討－Ｔ字型分岐部の影響－"、平成８年電気学会全国大会、No.1437

(10)岡部、大野、野嶋、斎藤、才田：
"GISの接地系における高周波サージ現象に関する検討－タンク絶縁区分部からの漏

洩－”、平成8年電気学会電力・エネルギー部門大会、No. 440
(11)岡部、山田、野嶋、若林、才田:
”GISの接地系における高周波サージ減少に関する検討－絶縁区分部からの漏洩に対する他相タンクの影響－”、平成9年電気学会全国大会 （投稿中）