

博士学位論文

電気鉄道き電システムの雷対策に向けた実測
およびシミュレーション技術に関する一研究

2016年11月

田中 弘毅

目次

1章	緒言	1
2章	鉄道のき電システム	4
2.1	概要	4
2.2	直流き電回路	5
2.3	交流き電回路	8
2.4	信号軌道回路	9
3章	鉄道における雷害事例	11
3.1	はじめに	11
3.2	雷撃数推移	11
3.3	電力設備故障例（SR-Trの雷による損傷）	13
3.4	信号設備故障例（キャパシタ焼損）	15
3.5	雷害のリスクアセスメント	16
4章	接地抵抗測定	18
4.1	はじめに	18
4.2	従来簡易接地抵抗測定法	18
4.3	簡易接地抵抗計を用いた高精度接地抵抗測定手法の提案	20
4.4	変電所接地網の接地インピーダンスの周波数特性測定	22
4.5	まとめ	25
5章	電鉄用変電所接地網の雷サージ特性実測	26
5.1	はじめに	26
5.2	サージインピーダンスと接地系電位分布の測定方法	26
5.3	サージインピーダンスと接地系電位分布の測定結果	31
5.4	まとめ	41
6章	電鉄用変電所の制御線に誘導される雷サージ電圧	43
6.1	はじめに	43
6.2	制御線誘導電圧の実測	43
6.2.1	制御線誘導電圧測定回路	43
6.2.2	制御線誘導電圧測定結果	45
6.3	雷サージ電流波形が及ぼす制御線誘導電圧への影響	47
6.3.1	制御線誘導電圧試験用電流源	47
6.3.2	接地網および制御線誘導電圧測定回路	47
6.3.3	雷サージ電流波形と接地網サージインピーダンスと制御線誘導電圧測定結果	48
6.4	まとめ	50
7章	数値シミュレーションによる避雷器位置の検討	51
7.1	はじめに	51
7.2	雷害事例	51
7.3	想定される雷電流	52
7.4	解析モデル	52
7.4.1	鉄塔モデル	53
7.4.2	送電線モデル	56
7.4.3	変電所モデル	57
7.4.4	その他モデル	59
7.5	避雷器配置が変圧器電圧に及ぼす影響	59
7.6	雷撃位置が変圧器電圧に及ぼす影響	61
7.7	避雷器設置位置最適化による雷害対策	63
7.8	雷電流の大きさによる比較	64

7.9	電鉄用変電設備機器の周波数特性.....	66
7.10	まとめ.....	67
8章	インピーダンスボンドの雷サージ解析.....	68
8.1	はじめに.....	68
8.2	インピーダンスボンドのモデリング.....	69
8.2.1	インピーダンスボンド.....	69
8.2.2	インピーダンスボンド端子間インピーダンス.....	70
8.2.3	インピーダンスボンド特性試験の測定結果.....	71
8.2.4	インピーダンスボンド等価回路定数.....	72
8.3	インピーダンスボンドの雷サージ解析.....	75
8.4	まとめ.....	77
9章	鉄道用レール周波数依存線路モデル.....	78
9.1	はじめに.....	78
9.2	鉄道用レールの等価均質線路.....	78
9.3	鉄道用レールの周波数依存線路モデル.....	80
9.3.1	線路直列インピーダンス.....	80
9.3.2	線路並列アドミタンス.....	81
9.3.3	Pade 近似を用いた Semlyen 線路モデル合成.....	82
9.4	提案レールモデルの精度検証.....	83
9.4.1	レール過渡応答フィールド試験.....	83
9.4.2	EMTP によるレール過渡応答シミュレーション.....	87
9.5	まとめ.....	88
10章	変電所接地サージインピーダンスと周波数領域インピーダンス.....	89
10.1	はじめに.....	89
10.2	インパルス電流注入による変電所接地過渡電圧上昇の実測.....	89
10.3	周波数領域の注入電流と変電所接地電圧.....	92
10.4	変電所接地インピーダンス.....	93
10.5	変電所接地サージインピーダンス.....	94
10.6	まとめ.....	96
11章	数値電磁界解析法と回路解析モデルの融合.....	98
11.1	はじめに.....	98
11.2	電鉄用変電所雷害事例.....	98
11.3	変電所接地電位上昇実測.....	99
11.4	水平埋設地線の FDTD シミュレーション.....	101
11.4.1	解析モデル.....	102
11.4.2	解析結果.....	102
11.5	水平埋設地線の EMTP シミュレーション.....	105
11.6	まとめ.....	109
12章	結言.....	111
13章	参考文献.....	114

図目次

図 2.1	鉄道電気設備の概要	4
図 2.2	近接する在来線と新幹線設備	5
図 2.3	直流電鉄用変電所の単線結線図例	6
図 2.4	直列 12 パルスシリコン整流器と整流器用変圧器	7
図 2.5	在来線・新幹線交流変電所結線例	9
図 2.6	軌道回路の電流の流れ	10
図 3.1	落雷数（フラッシュ数）の月変化	11
図 3.2	年間雷日数（2011 年）	12
図 3.3	落雷数（フラッシュ数）の年度変化	12
図 3.4	2006 年から 2012 年営業エリア内の落雷数（フラッシュ数）	13
図 3.5	雷害を被った変電所の単線結線図	14
図 3.6	絶縁破壊したシリコン整流器用変圧器 SR-Tr	14
図 3.7	埋設された接地網の状態	15
図 3.8	鉄道信号設備における輸送障害の原因	15
図 3.9	自然災害の要因	16
図 3.10	雷害により損傷した機器	16
図 3.11	雷害発生に伴う被害額および輸送への影響	17
図 4.1	接地抵抗の定義	19
図 4.2	測定の基準点	19
図 4.3	電圧降下法	20
図 4.4	簡易接地抵抗計による接地抵抗測定例	20
図 4.5	簡易接地抵抗計を用いた高精度な接地抵抗測定例	21
図 4.6	接地網と P 極間距離を変えた場合の接地抵抗値	21
図 4.7	打込式接地極接地装置	22
図 4.8	在来線直流電鉄用 T 変電所	23
図 4.9	補助電極の配置	24
図 4.10	接地抵抗の周波数特性	25
図 5.1	サージインピーダンス・電位分布測定回路	28
図 5.2	電流・電圧極及び補助線敷設図	28
図 5.3	I 変電所補助線構内敷設	29
図 5.4	I 変電所測定箇所	29
図 5.5	I 変電所屋外接地系統	30
図 5.6	I 変電所屋内接地系統	31
図 5.7	き電側(⑨11H キュービクル)避雷器接地端子電流注入時の電流・注入点電圧	32
図 5.8	受電側(②MOF キュービクル)避雷器接地端子電流注入時の電流・注入点電圧	32
図 5.9	避雷器接地端子注入電流	34
図 5.10	き電側避雷器注入時の測定点電位上昇	36
図 5.11	受電側避雷器注入時の測定点電位上昇	37
図 5.12	接地系の電位分布（き電側避雷器接地端子（11H,13H）注入）	39
図 5.13	電位波形比較（き電側避雷器注入）	39
図 5.14	接地系の電位分布（受電側避雷器注入）	40
図 5.15	電位波形比較（受電側避雷器注入）	40
図 5.16	遠制接地電位上昇特性	41
図 6.1	新幹線変電所における制御線誘導電圧測定	43
図 6.2	新幹線変電所における制御線誘導電圧測定回路	44
図 6.3	制御ケーブル誘導電圧測定に用いた注入電流波形(IG)	46
図 6.4	54L 制御ケーブルの誘導電位の実測結果	46
図 6.5	配電盤の 54L 制御ケーブルと接地端子間の電圧	46
図 6.6	制御ケーブル誘導電圧測定に用いた注入電流波形 (PG, ICG)	47

図 6.7	波頭長の異なる電源装置による接地網サージインピーダンス測定	48
図 6.8	電源装置の異なる配置によるサージインピーダンス	49
図 6.9	54L 接地線の電位	50
図 7.1	雷害を受けた変電所の構成	51
図 7.2	雷害を受けた変電所近傍の雷分布	52
図 7.3	送電鉄塔の配置	53
図 7.4	鉄塔モデル回路	54
図 7.5	変電所モデル回路	57
図 7.6	避雷器の電圧—電流特性	57
図 7.7	浮遊容量を考慮した変圧器モデル回路	58
図 7.8	フラッシュオーバーモデル回路	59
図 7.9	変電所配置詳細 (SR-Tr と D-Tr の侵入雷サージ)	60
図 7.10	現在の機器配置における計算結果	60
図 7.11	SR-Tr1 次側 R 相侵入雷サージ電圧 (鉄塔塔頂 30 kA 雷撃)	62
図 7.12	SR-Tr1 次側 R 相侵入雷サージ電圧 (鉄塔塔頂 30 kA 雷撃, 各鉄塔毎)	62
図 7.13	提案する避雷器設置位置	63
図 7.14	避雷器設置位置最適化による雷サージ低減効果	64
図 7.15	SR-Tr1 次側 R 相侵入雷サージ電圧 (雷撃電流値)	65
図 7.16	変圧器の周波数特性	67
図 8.1	軌道回路の電流の流れ	69
図 8.2	インピーダンスボンド特性試験回路	70
図 8.3	インピーダンスボンドモデル回路	71
図 8.4	インピーダンスボンド端子間インピーダンス実測結果	72
図 8.5	インピーダンスボンド 1 次側巻線インピーダンス高周波等価回路	73
図 8.6	インピーダンスボンド端子間インピーダンス計算結果	74
図 8.7	共振キャパシタの周波数特性に対するインピーダンス	75
図 8.8	インピーダンスボンドの実測回路 (Case 5, Case 6)	76
図 8.9	インピーダンスボンド過渡試験注入電流	76
図 8.10	インピーダンスボンド共振キャパシタ電流 (Case 6)	76
図 8.11	インピーダンスボンド過渡試験注入電流シミュレーション結果	77
図 8.12	インピーダンスボンド共振キャパシタ電流シミュレーション結果	77
図 9.1	まくらぎを考慮したレールの分布定数線路モデル	79
図 9.2	まくらぎの集中定数等価回路	82
図 9.3	レールアドミタンスの実測時の等価回路	82
図 9.4	レール過渡特性フィールド試験回路	84
図 9.5	線路定数の実測および計算結果	86
図 9.6	レール等価特性アドミタンス	86
図 9.7	レールを伝搬する進行波波形変歪	86
図 9.8	提案レールモデルを用いたシミュレーション回路	87
図 9.9	提案レールモデルのシミュレーション結果	88
図 9.10	レール過渡応答に及ぼすレール線路定数の影響	88
図 10.1	接地インピーダンスフィールド試験を実施した新幹線変電所	90
図 10.2	注入電流波形	91
図 10.3	電圧の実測結果	91
図 10.4	LLT により得られる電流の実測結果の周波数応答	92
図 10.5	LLT により得られる電圧の実測結果の周波数応答	93
図 10.6	LLT を用いて変換した電圧と電流の比によって定義されたインピーダンス	94
図 10.7	LLT を用いて変換した電圧と電流の比によって定義されたインピーダンス	94
図 10.8	異なる電流源を用いた場合のサージインピーダンス	95
図 10.9	異なる波頭長によるサージインピーダンス	96
図 11.1	直流電鉄用変電所における避雷器設置位置	99

図 11.2	模擬雷電流注入による接地網電位測定回路	100
図 11.3	模擬雷電流注入による変電設備接地端子の電位測定箇所	101
図 11.4	避雷器接地線から接地網へ注入する電流	101
図 11.5	模擬雷電流注入による接地網電位分布	101
図 11.6	FDTD 法によるシミュレーションモデル	102
図 11.7	埋設接地線の電位分布	103
図 11.8	埋設接地線電位の周波数特性	104
図 11.9	埋設地線自己および相互インピーダンスの周波数特性	105
図 11.10	線路定数のステップ応答	107
図 11.11	Semlyen 線路モデルを用いたシミュレーション結果	108
図 11.12	π 型等価回路を用いたシミュレーション結果	109

表目次

表 2.1	シリコン整流器 SR の定格.....	8
表 2.2	交流き電用変電所の受電電圧と短絡容量.....	9
表 3.1	2006 年から 2012 年営業エリア内の落雷数（フラッシュ数）.....	13
表 4.1	土の種類とその抵抗率.....	23
表 4.2	接地抵抗測定結果.....	24
表 5.1	サージインピーダンス・電位分布測定における測定器仕様.....	28
表 5.2	電位上昇（サージインピーダンス）測定結果.....	34
表 5.3	サージインピーダンス測定結果比較表.....	34
表 5.4	最大電位分布測定結果（き電側避雷器 11H 注入）.....	38
表 5.5	最大電位分布測定結果（受電側避雷器注入）.....	38
表 6.1	制御ケーブル誘導電位の測定試番.....	45
表 6.2	誘導電圧の最大値.....	47
表 6.3	電源の仕様.....	47
表 7.1	鉄塔モデル定数.....	55
表 7.2	送電線モデルの諸元.....	56
表 7.3	変電所モデルの諸元および定数.....	58
表 7.4	フラッシュオーバモデルのスイッチ投入時間とインダクタンス.....	59
表 7.5	EMTP シミュレーション結果.....	65
表 8.1	インピーダンスボンド特性測定試番.....	71
表 9.1	レールのサージ伝搬特性試験試番.....	84
表 9.2	フィールド試験定数.....	85
表 9.3	まくらぎの等価回路定数.....	86
表 9.4	レール等価 Semlyen 線路特性アドミタンス定数.....	87
表 9.5	レール等価 Semlyen 線路波形変歪定数.....	87
表 10.1	接地インピーダンス試験用電源波頭および波尾時間 (T_f and T_t).....	90
表 10.2	時間領域のサージインピーダンスと周波数領域のインピーダンス.....	95

1章 緒言

本論文は、我が国のインフラを担う電気鉄道において、実測およびシミュレーション技術を導入することにより電気設備の雷害を防止し、鉄道の安全・安定輸送を確保することを目的とする。日本のもうひとつの重要なインフラである電力設備は、雷サージシミュレーションに基づく雷害対策がなされ、安定な電力供給が実現されている。これは、高構造物である送電鉄塔が多雷地区である山間部に設置されているため、雷害が電力供給支障の原因の多くの割合を占めるためである。なお、これらの数値解析技術は一朝一夕に確立されたものではなく、数多くの実測結果を吟味した長年の研究成果の賜物である。これに対し、鉄道設備は高構造物をほとんど有しないことも一因であるが、これまで雷害対策はもっぱら避雷器の設置と接地抵抗の低減に力点が置かれ、実測のみならず、理論的あるいは数値的な解析があまりなされてこなかった。しかしながら、近年雷サージを原因とする設備故障が増加している。この要因の一つに、技術進歩に伴う電気鉄道用電気設備の更新が考えられる。例えば、電気鉄道用変電設備を保護する継電器もその一つである。近年は電子回路による静止型の保護継電器に置き換えられつつある。各機器に対する耐雷性試験は機器製造業者によりなされているが、雷害対策の礎であるこれら機器を組み合わせて成り立つシステムとしての耐雷性試験・実測は、あまりなされていない現状にある。また、実測例はあっても、これを雷害対策に生かすべく理論的に検討した事例は極めて少なく、事業者間での情報共有も稀である。

電気鉄道システムと電力システムとの最大の相違点は、高電圧を使用する電力設備いわゆる強電設備と低電圧を使用する信号設備いわゆる弱電設備が同一フィールドに混在していることである。例えばレールは電力の帰環線として用いられるのみならず、列車を検知するセンサとしても用いられている。この混在が、さまざまな障害を発生させている。また、重要な電力システムでは、バックアップ機能を持つ多重系とすることが常であるが、電気鉄道の電気設備には一重系のもも多数存在する。一重系に一旦障害が発生すれば復旧までに要す時間は長くなり、利用者は多大なる迷惑を被ることになる。しかしながら、すべての設備を多重化するには膨大な費用が必要となり、現実的ではない。例えば、直流電鉄用変電所の雷害事例のひとつにシリコン整流器の損傷がある。直流区間において、シリコン整流器は交流を直流に変換する最も重要な機器である。変電所によっては複数台設置され多重化されているものの、多くの場合単機運転である。このため、この機器の損傷は列車の安全・安定輸送に大きな影響を与えるため、適切な対策が必要になる。以上の観点から、適切な設計に基づく合理的な電気鉄道設備構築が望まれている。本論文では、鉄道の安全・安定輸送に求められる雷害対策に必須の電気鉄道設備の雷サージ応答を実測すると共に、シミュレーション技術について検討する。

送電網から電力を受電し、列車に供給するシステム全体を総称して、き電システムという。き電システムに用いられる「き」は、以前、非常用漢字である「饋」が使用されていた。この文字には「食物を貴人にすすめる、または神や他人に物を送る」という意味がある。このような由来のもと、重要なインフラである列車に対してエネルギー源である電力を送ることから、現在でも「き電」という言葉が用いられている。

このき電システムは、一般的な電力システムとは異なる特徴を持つ。最大の相違点は、電気鉄道の負荷は絶えず移動するということであるが、これに加え、これらの負荷も含めたすべての設備が自社内にあることである。したがって、電力変動は大きいものの、設備の把握が容易であり、雷害対策

が電力系統と比して容易である。しかしながら、鉄道事業者の営業エリアは電力事業者のそれと同等もしくはより広大となる場合もあり、落雷数の増加に伴い以前は想定されなかった雷害が各地で発生している。

電力系統では、発生する事故・障害等の対策を検討する上で、シミュレーション技術が導入されてきたが、電気鉄道では十分であるとは言い難い状況にある。これは、電車線の架線構造が複雑であり、使用する線種も線区によって多種多様であることや、それぞれ異なる経年の設備が混在していることが一因である。

電力系統におけるシミュレーション技術は、定常解析と過渡解析に分けられる。さらに、具体的な解析手法は、EMTP (Electromagnetic Transients Program)などの大規模システムに適用し得る回路解析法および3次元の導体模擬が可能であるFDTD (Finite-Difference Time-Domain)法などの電磁界解析法に大別される。商用周波数領域における定常状態の系統解析には主に複素記号法により回路方程式を代数方程式に変換して解く回路解析法が、開閉・雷サージ解析等過渡状態の系統解析には回路方程式である微分方程式を解く回路解析法が使用されてきた。なお、雷サージ解析分野では、3次元構造を有する機器を比較的容易に表現でき、3次元電磁界、電圧電流分布を求め得る電磁界解析法が近年用いられ始めている。この計算手法は過去に確立されていたものの実用化が遅れた原因は、計算を実行できる性能を有する計算機が限られていたためである。近年の計算機性能の目覚ましい向上により、汎用計算機でも実行時間で計算が実行できるようになり、雷サージ解析分野においても利用が広まりつつある。しかしながら、メモリ容量等の制限から、広範囲に渡る電力系統を解析することは、未だ不可能な現状にある。シミュレーション技術の導入にあたり、電力設備、電気鉄道用電気設備いずれであっても解析対象の回路モデルが作成できれば、回路解析の各種技術を用いた計算が可能になり、今後の雷害対策のみならず、日々発生する障害に対する早急な対策を提案することができ、また設計段階から様々な検討に大いに生かすことができる。さらに、回路解析法と電磁界解析法を融合することができれば、計算可能な領域が格段に広がることになり、これまでよりも高精度な計算を実現することができる。

本論文は、雷サージ特性の把握並びに数値解析技術の高度化に必須である、電気鉄道設備における雷サージ特性実測を各所で行い、これらの設備に雷電流が流入した場合の様相を明らかにし、またこれまでに培われた電力系統過渡現象シミュレーションツールを鉄道電気設備に適用すると共に、鉄道設備特有の回路解析モデルを開発する。

第1章では、我が国のインフラを担う電気鉄道の安全・安定輸送の重要性を述べ、電化からの経年とともに電気設備の更新が多様化されつつある中で、雷撃に伴う機器故障が増加しており、電気鉄道用電気設備全体的な雷害対策が急務であるという研究背景を述べている。

第2章と第3章では、直流および交流電気鉄道のみ電システムの概要を述べ、それらには強電と弱電設備が混在して運用されていることを示している。さらに、それぞれの分野における雷害の具体例を示し、リスクアセスメントの観点から雷害発生に伴う被害額および輸送への影響を示している。

第4章では、電鉄用変電所接地網の接地抵抗値に着目し、変電所開業当初は電圧降下法による測定がなされるが、その後の接地抵抗値管理に使用する簡易測定器を使用した場合であっても高い精度の結果を得ることができる新たな測定手法を提案している。

第5章と第6章では、電鉄用変電所を対象とし、これまで鉄道用変電所ではあまり事例の少ない模擬雷注入によるフィールド試験結果を示すことにより、実際に変電所で発生した雷害事例を再現して、発生原因を究明し、それらに対し具体的な対策を示している。

第7章では、電鉄用変電所におけるシリコン整流器用変圧器損傷を事例に挙げ、当該の変電所だけでなく電力系統を含む検討にシミュレーション技術を適用・解析し、シミュレーションによってのみ検討可能となる具体的事例について分析し、対策例を述べている。

第8章と第9章では、インピーダンスボンドとレールに注目し、これらに雷サージが流入した場合の過渡特性について、実測およびシミュレーションの両面から検討し、実測を良好に再現できるシミュレーション回路モデルを開発している。

第10章では、電鉄用変電所の過渡接地インピーダンスの特性をフィールド試験結果および数値ラプラス変換により求め、過渡応答評価として広く使用されている最大電圧と最大電流の比で定義される時間領域の接地システムサージインピーダンスが、波頭長の逆数 $1/T_f$ で与えられる周波数における周波数領域インピーダンスとほぼ等しくなることを明らかにしている。

第11章では、FDTD解析を用いることによって、3次元電流分布を考慮した回路解析（EMTPシミュレーション）を可能にする手法を提案している。この等価回路導出と回路解析法は、電鉄用変電所における電力および信号設備の雷被害を含むサージ防護および設計において、有用な知見を与える。

第12章では、以上の内容をまとめ、本論文の研究成果を応用すれば、FDTD法など電磁界解析のみでは解析が不可能であった大規模回路、あるいは変圧器など大型機器とケーブルなどの小型機器が混在する回路を回路解析法により計算できることを示している。

2章 鉄道のき電システム

2.1 概要

本章では、電気鉄道特有のき電システムについて述べる。日本の電気鉄道は、新幹線は交流 25 kV、在来線は主に、交流 20 kV、直流 1.5 kV を採用し、営業エリアは交流区間と比べて、直流区間の方が広い。

図 2.1 に鉄道電気設備の概要を示す。図は一般的な在来線直流の複線区間を示しており、列車に電力を供給するトロリ線、その上部にはトロリ線へ電力を供給するき電線がある。トロリ線とき電線は約 250 m 毎にき電分岐装置により接続されている。これらの線状類を吊架しているのが、鉄構、柱やビームと呼ばれる構造物である。近年では、柱状構造物として鋼管柱が使用されつつあるが、従来から使用しているコンクリート柱が多数を占める。き電線には約 500 m 毎に避雷器が設置されている。また、柱には雷害防止のため架空地線が装架されている。架空地線が全線に敷設されていることは稀であり、雷害を受けやすいエリアに優先的に敷設している事業者が多い。その他、6.6 kV の高圧配電線には、沿線の信号設備に配送電している信号用高圧配電線と駅設備へ電力を送る電灯電力用高圧配電線とがある。また、低圧負荷に電力を送る低圧ケーブルも装架されている。一方、線路沿線には、信号機や踏切などの信号用設備の機器が存在している。図 2.1 に示すインピーダンスボンドは、帰線電流と信号電流を区分し、列車の在線検知の役割を有する。これはき電システム（強電）と信号システム（弱電）が共存している例である。

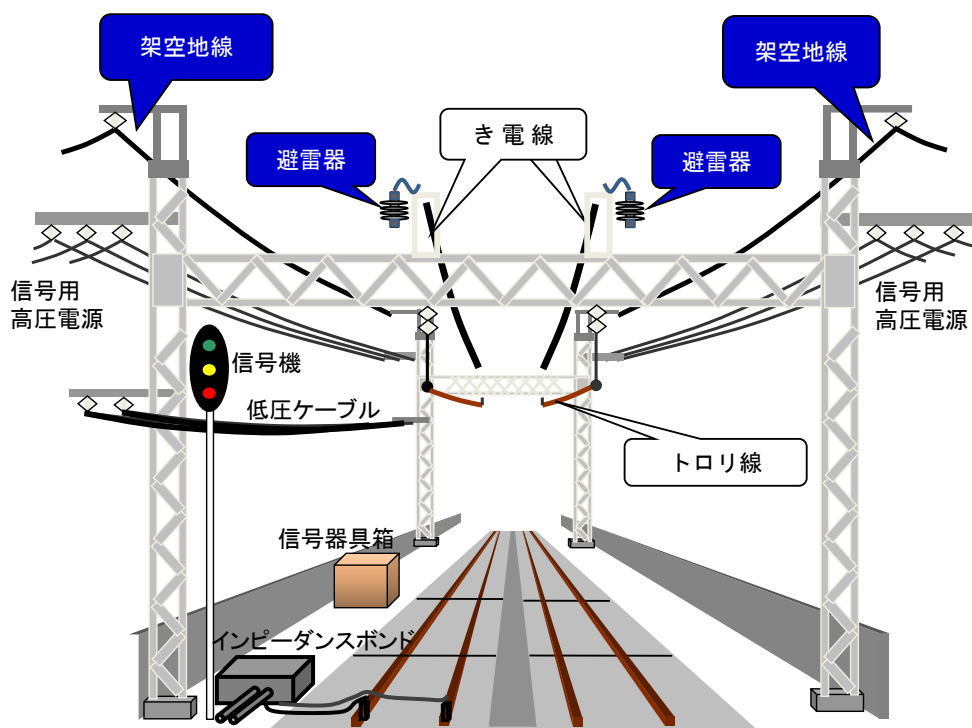


図 2.1 鉄道電気設備の概要

図 2.2 に在来線と新幹線設備の位置関係の一例を示す。このように直流き電である在来線と交流き電である新幹線設備が近接した位置に存在する区間も多数存在する。電気鉄道の電力や信号の各種検討には従来通り基本的に在来線、新幹線それぞれ独立して検討することで十分であるが、一方

のき電システムで発生した障害が他方のシステムに波及する可能性のある雷害対策の検討などは、両き電システムを合わせて検討する必要がある。しかしながら、接地、避雷器など雷サージ侵入に関しては、両システムに共通事項が多く、雷害対策については、必ずしも両システム毎に検討手法を変更する必要はない。

以上のように、鉄道電気設備は強電システムと弱電システムが狭い範囲に存在する特徴を持つ。これにより、一方の設備で発生した故障が他方へ影響を与える場合も考えられる。実際、新幹線の架空地線への雷害が在来線の信号設備に影響を与えたと推定される事象も発生している。



図 2.2 近接する在来線と新幹線設備

2.2 直流き電回路

直流電鉄用変電所は、三相交流を直流に変換して電気車に供給するため、受電設備、整流器用変圧器 SR-Tr, シリコン整流器 SR, 高速度遮断器, 電力ろ波器などから構成されている。一般的には、電力会社や自営電源から特別高圧で受電した電力を変圧器で交流 1.2 kV に降圧し、SR により標準電圧直流 1.5 kV (無負荷電圧 1620 V, 電圧変動率 5%あるいは 8%) に変換している。整流器には、1955 年頃までは回転変流器や水銀整流器が使用されていた⁽¹⁾が、半導体技術の進歩に伴い、1960 年頃から信頼性および保守性に優れる SR が使用されるようになった。最近では電力回生の特性を生かすために、電圧を一定に制御するサイリスタ整流器や自励式整流器が一部の变電所で採用されている。

図 2.3 に 77 kV 受電の直流電鉄用変電所の単線結線図の一例を示す。図左側に示す Δ -Y- Δ 変圧器 SR-Tr が供給する系統は、12 相の SR-Tr, 直列 12 相の SR を介して、直流 1.5 kV を 4 回線にき電している。一方、同図右側 Δ - Δ 変圧器 D-Tr が供給する系統は交流 77 kV を交流 6.6 kV に降圧する高圧配電線用変圧器を介して駅設備などに電力を供給している。図 2.4 は、直列 12 パルスの SR と SR-Tr (1500V, 6000kW, 沸騰冷却式) を示す。

受電系	WR-3
変成器系	WG-2
共通系	WFD-1
き電系	WFD-2C
き電系	WFD-2X5
き電系	WFD-3
高配変圧器系	WD-2
高配系	WDD-1X2
高配系	WDD-2X2

電力会社 〇〇変電所
3φ 77kV 60Hz

〇〇変電所
所在地：〇〇県〇〇市〇〇 〇丁目〇番〇号
干口径：〇〇線 〇〇起点 〇〇km 〇〇

※ 送方制御機器
■ 作業用接地装置（主回路側）
▼ 作業用接地装置（接地側）

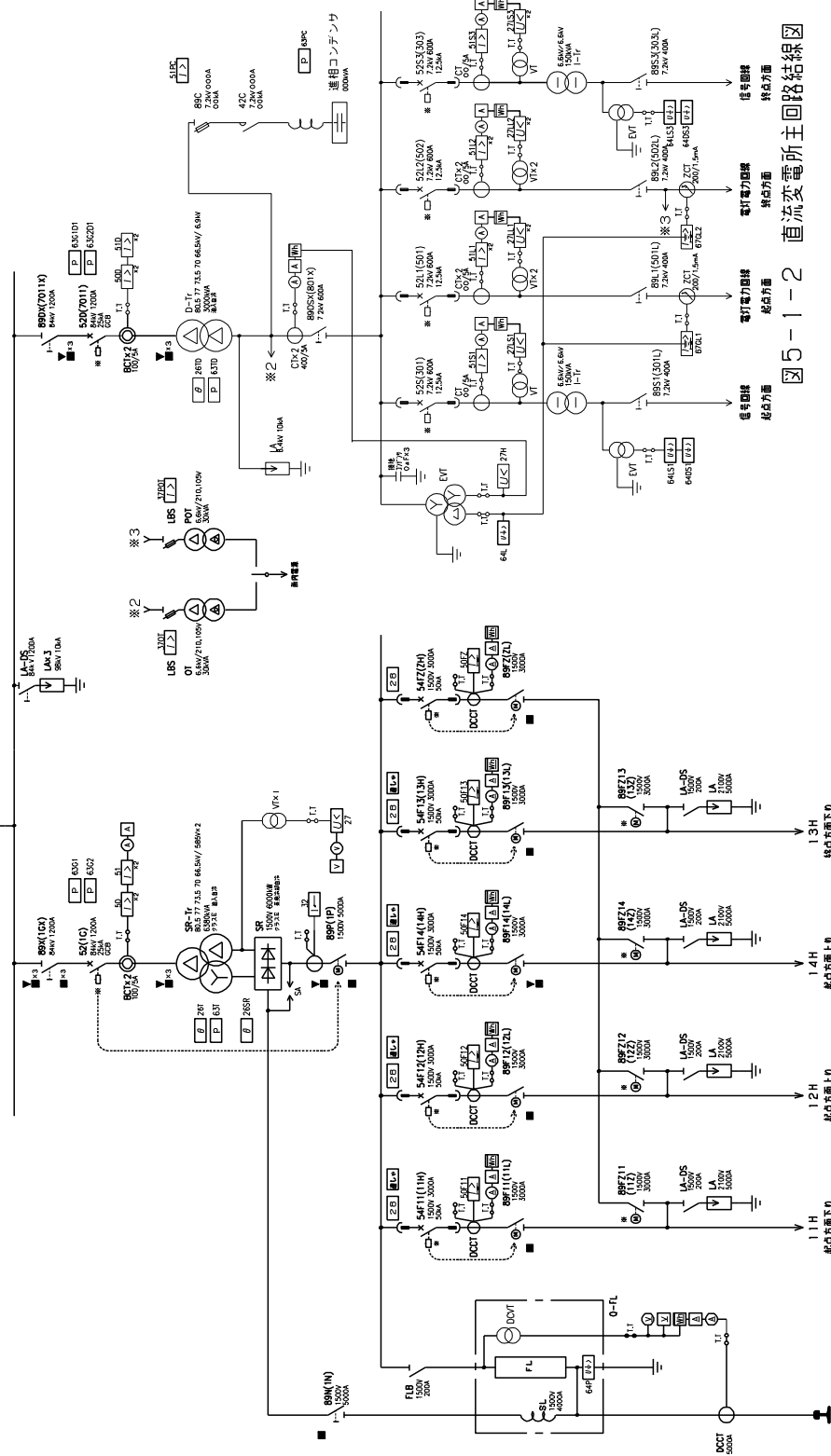


図 2.3 直流電鉄用変電所の単線結線図例

図 5-1-2 直流変電所主回路結線図



図 2.4 直列 12 パルスシリコン整流器と整流器用変圧器
(1500V, 6000kW, 沸騰冷却式)

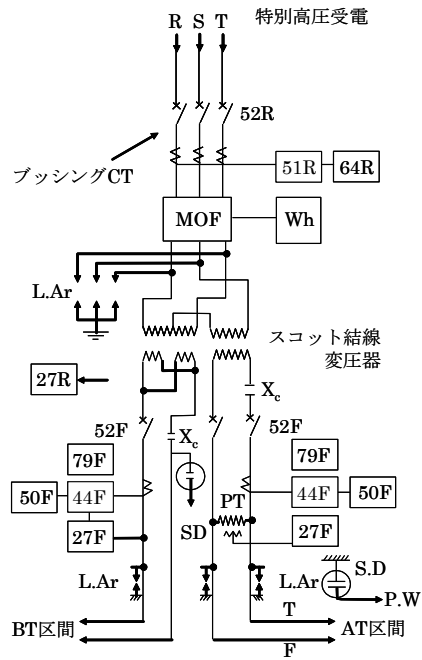
表 2.1 に SR の定格を示す。一般に SR の定格はクラス E とし、SR と SR-Tr は同一容量を用いるが、変電所負荷の瞬時最大出力 (Z) と 1 時間最大出力 (Y) の比が 2.5 以上と予想される場合には、SR はクラス E, SR-Tr はクラス D の組合せを用いる。また線区によっては SR 2,000 kW 以下の使用を検討する場合もある。ここで、クラス D とは、その定格において連続使用し、機器の温度が最終の一定値に達したのち、定格出力の 1.5 倍の負荷で 2 時間使用したとき、文献(2)(JEC-2410-2010)に定める温度上昇、その他の制限を超過することなく、更に定格負荷より定格出力の 3 倍の負荷で 1 分間使用しても実用上なんら問題なく引き続き使用し得る定格をいう。一方、クラス E は、その定格において連続使用し、機器の温度が最終の一定値に達したのち、定格出力の 1.2 倍の負荷で 2 時間使用したとき、本規格に定める温度上昇、その他の制限を超過することなく、更に定格負荷より定格出力の 3 倍の負荷で 1 分間使用しても実用上なんらさしつかえることなく引き続き使用し得る定格をいう。

表 2.1 シリコン整流器 SR の定格

		三相ブリッジ直列 12 相							二重三相ブリッジ 12 相						
定格出力 [kW]		6,000	4,000	3,000	2,000	1,500	1,000	500	6,000	4,000	3,000	2,000	1,500	1,000	500
定格電圧 [V]	交流 Ea	585							1,170						
	直流 Ed	1,500							1,500						
定格電流 [A]	交流 Ia	3,270	2,180	1,630	1,090	820	540	270	1,630	1,090	820	540	410	270	140
	直流 Id	4,000	2,670	2,000	1,330	1,000	670	330	4,000	2,670	2,000	1,330	1,000	670	330

2.3 交流き電回路

交流き電回路にき電する変電所は、交流三相送電線から受電して電気車に適した電圧に変換して単相交流としてき電している。結線例を図 2.5 に示す。その受電電圧と受電端の系統短絡容量の概略値を表 2.2 に示す。



- 52 : 交流しゃ断器
- 51 : 過電流継電器
- 64 : 地絡継電器
- 44 : 距離継電器
- 27 : 低電圧継電器
- 50 : ΔI形故障選択, 継電器
- 79 : 再閉路継電器, MOF, 計器用電圧電流, 変成器

図 2.5 在来線・新幹線交流変電所結線例

表 2.2 交流き電用変電所の受電電圧と短絡容量

線区		受電電圧 (kV)	三相短絡容量 (MVA)
在来線 (20 kV)	特別高圧	66, 77, 110, 154	300~3000
	超高圧	187, 275	1200~5000
新幹線 (25 kV)	特別高圧	77, 154	500~3300
	超高圧	220, 275	3000~10000

2.4 信号軌道回路

図 2.6 に複数のインピーダンスボンドを含む軌道回路⁽³⁾を示す。インピーダンスボンドは、帰線電流を変換する 1 次巻線、信号電流を結合する 2 次巻線、信号電流を検知する 3 次巻線で構成される。インピーダンスボンドの典型的な巻線比は、1:1:20 である。このインピーダンスボンドは、レールに流れる帰線電流と信号電流を区分する機能を有し、電力（強電）システムと信号（弱电）システムが共存する代表例である。架線から列車に流れた電流は、各レールに分流する (I_1, I_2)。この電流の和 I_1+I_2 は、変電所への帰路電流となる。レールの接続箇所は絶縁されているため、隣接する区間にインピーダンスボンドの 1 次巻き線中点を介して電流が流れる。一方、信号電流はインピーダンスボンドを介してレール間を循環電流として流れる。信号電流は、帰線電流に重畳され線間モード電流として流れ、帰線電流は零相モード電流として流れる。

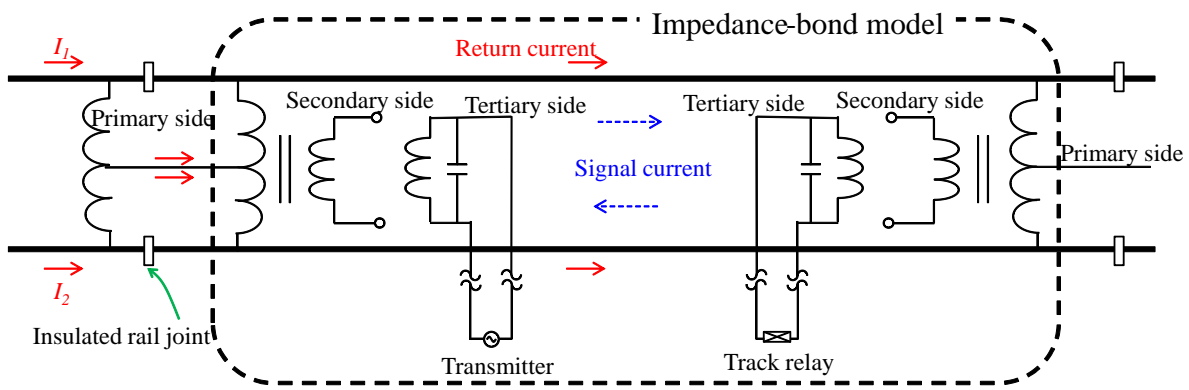


図 2.6 軌道回路の電流の流れ

3章 鉄道における雷害事例

3.1 はじめに

本章では、ある鉄道会社の落雷数に着目し、その推移や雷害事例を紹介する。近年、日本における雷撃数は増加傾向にある⁽⁴⁾。この傾向は、今回対象とする鉄道事業者管内においても同様であり、それに伴い雷撃が原因と推定される事象がさまざま発生している。これらの事象について、電力設備故障に関する例として整流器用変圧器 SR-Tr の損傷を、また、信号設備故障に関する例としてインピーダンスボンド内に付設されているキャパシタ焼損を取り上げる。その他にも鉄道施設を対象にさまざまな雷害が発生しているため、それらの傾向について記述する。

3.2 雷撃数推移

図 3.1 に、2008 年から 2012 年の 5 年間に総営業キロ数約 5000 km の管内で確認された落雷数(フラッシュ数)を示す。落雷数は、年間を通じて 6 月から 7 月にかけて増加し、一年を通じて夏期の落雷数が最も多い。また、2008 年および 2012 年は全体的に落雷数が多い。これは、同年の雷撃に起因する設備故障が多かったことと一致する。また、図 3.2 は 2011 年の年間雷日数を示す。同図より、2011 年は日本海沿岸の落雷が多かったことを示す。図 3.3 は管内における 1992 年から 2008 年にかけて観測された落雷数の年度変化を示している。それぞれの年による差異はあるものの、夏季雷の数が圧倒的に多いことが確認される。

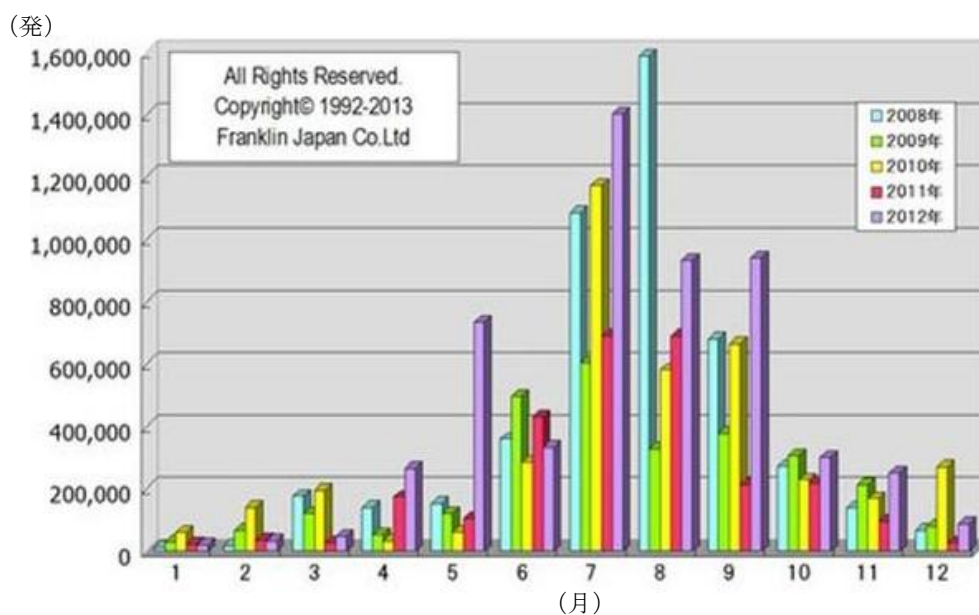


図 3.1 落雷数 (フラッシュ数) の月変化

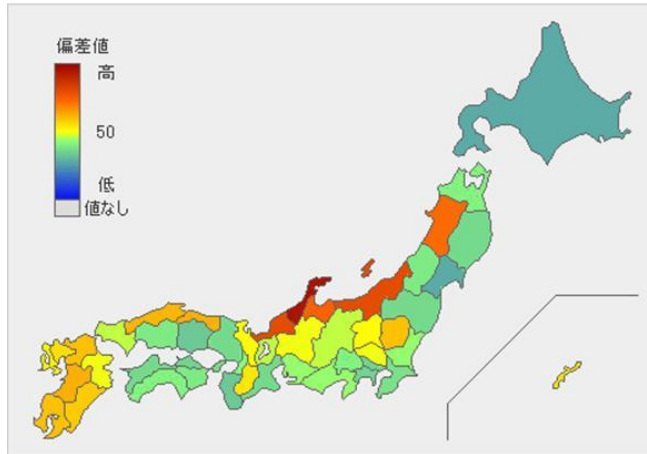


図 3.2 年間雷日数 (2011 年)

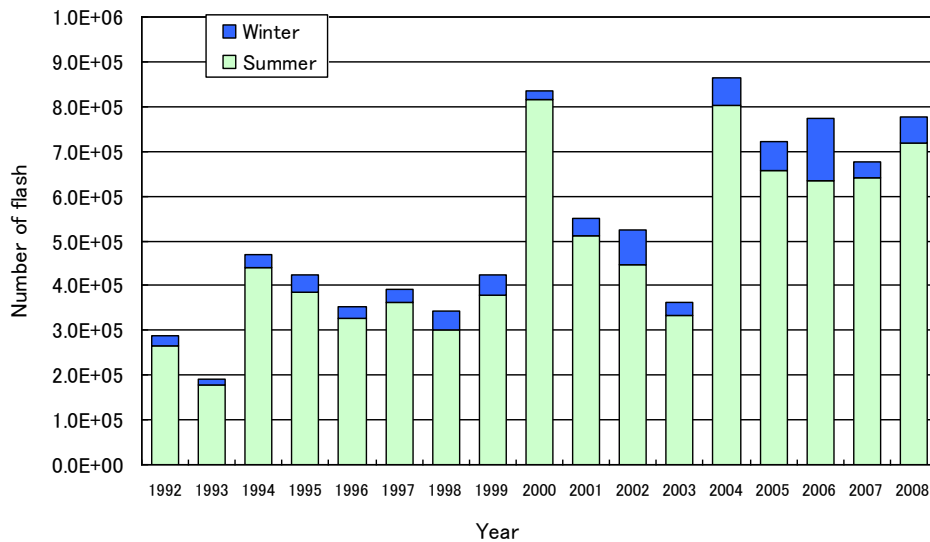


図 3.3 落雷数 (フラッシュ数) の年度変化

2006 年から 2012 年にかけて、管内で観測された落雷数 (フラッシュ数) を示したものを図 3.4 および表 3.1 に示す。落雷数を計数するメッシュは、5 km×5 km で構成されている。それぞれのメッシュにおいて、900 回以上落雷が観測された地域を赤、600～899 回以下を黄、300～599 回以下を緑、0～299 回以下を白で表示する。これより、山間部でかなりの雷放電が観測されることに加え、関西、山陽地方では、鉄道網が密である都市部においても比較的雷放電が多い。したがって、これらの地域では十分な雷対策が必要である。

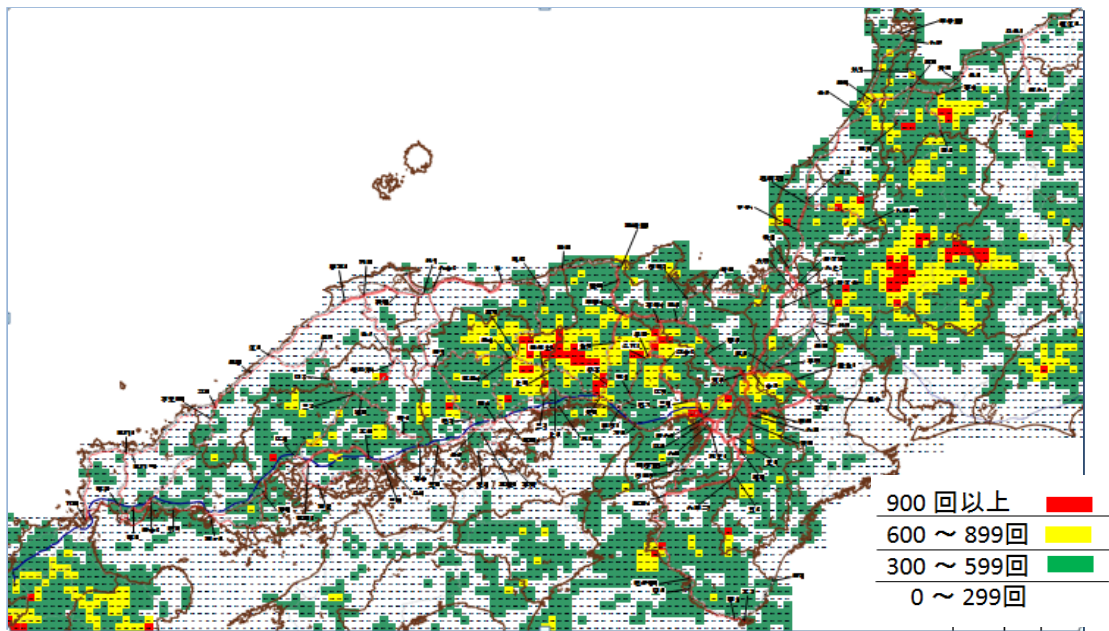


図 3.4 2006 年から 2012 年営業エリア内の落雷数（フラッシュ数）

表 3.1 2006 年から 2012 年営業エリア内の落雷数（フラッシュ数）

メッシュ数	5066	年平均
総合計雷数	2,277,201	379,534
1 メッシュあたりの平均雷数	399	57
1 メッシュあたりの最大雷数	1,400	
1 メッシュあたりの最小雷数	19	

3.3 電力設備故障例（SR-Tr の雷による損傷）

在来線直流変電所において、SR-Tr が損傷する事象が発生した。このとき、当該変電所が電力を受電している電力会社の系統も同時に停電し、また当時の落雷データから変電所 1 km 以内で雷撃があったと推定される。SR-Tr は、1 次側 V 相巻線が著しく絶縁破壊し、1 次側と 2 次側の間に挿入されている混触防止板には損傷もアーク痕も見られなかった。また、埋設された接地線の状態を確認したところ腐食、損傷、断線は確認されなかった。文献(32)にもあるような接地線の不要な引き回しもなかった。

図 3.5 は、被害にあった変電所の単線結線図を示す。この変電所は、電力系統から 66 kV で受電し、主要な機器として、SR-Tr1 台、SR1 台、高圧配電線用変圧器 1 台を有する。避雷器は、図 3.5 に示すように AC 66 kV 母線に設置されている。また、損傷した SR-Tr は遮断器等を介してこの母線に接続されている。図 3.6 は、絶縁破壊した SR-Tr を示す。この事象が発生した後の埋設された接地網の状態確認状況を図 3.7 に示す。調査の結果、接地網に目立った損傷、また断線や腐食といった状況も確認されず、至って健全な状態であった。変電所の設備は健全であったため 7 章で述べる様に、既設設備の避雷器の設置位置や接地点等の構成について見直した。

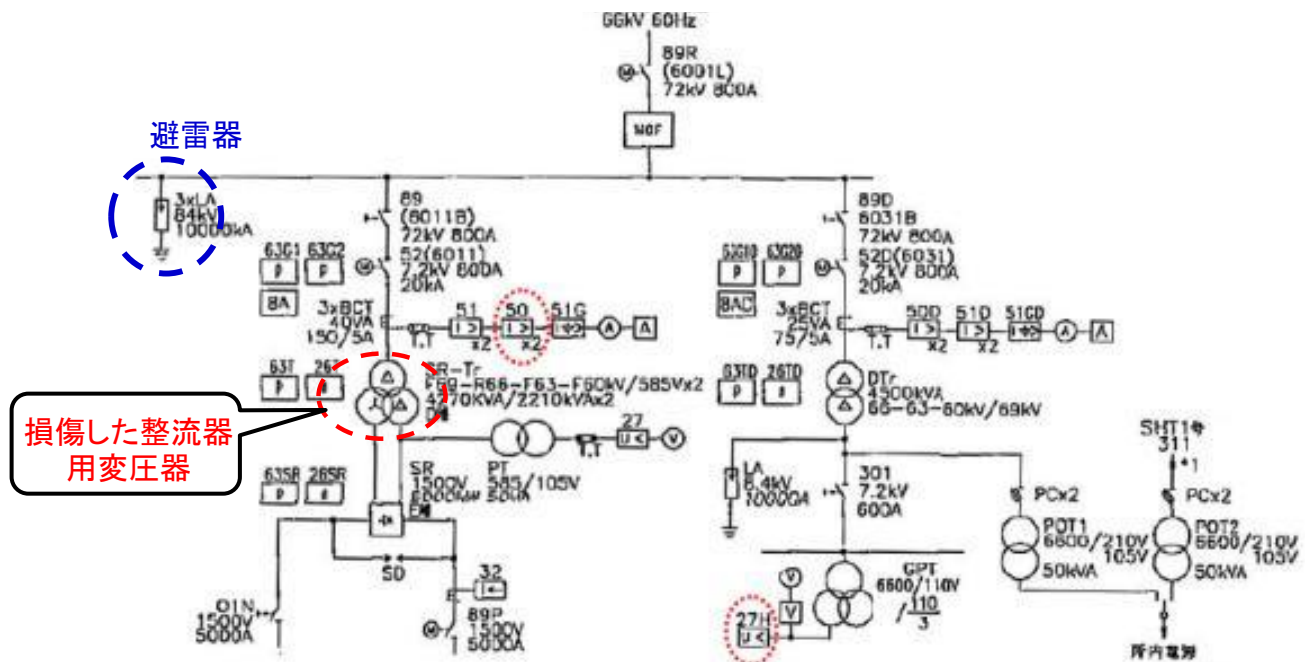


図 3.5 雷害を被った変電所の単線結線図

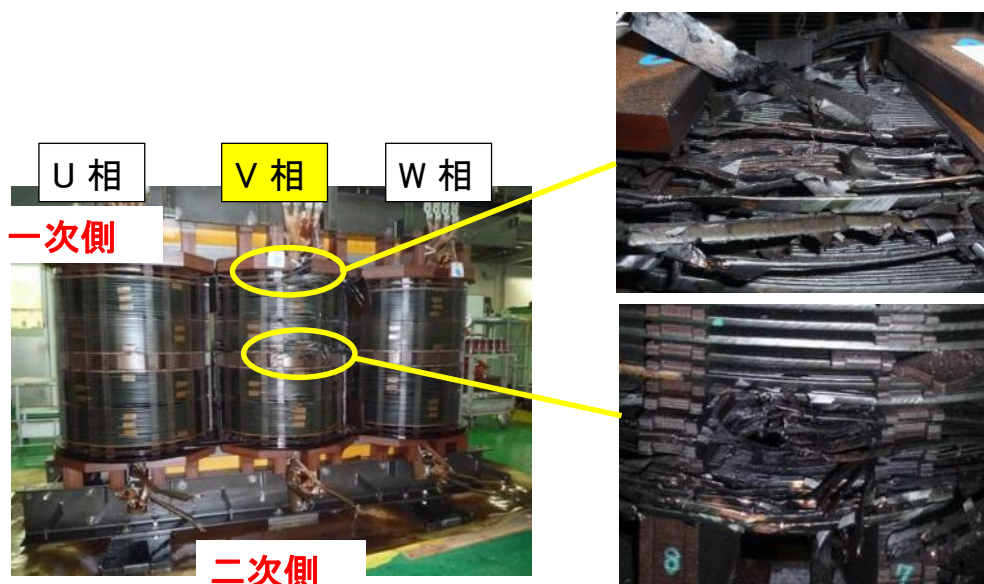


図 3.6 絶縁破壊したシリコン整流器用変圧器 SR-Tr



図 3.7 埋設された接地網の状態

3.4 信号設備故障例（キャパシタ焼損）

図 3.8 に 2008～2012 年のある鉄道事業者における鉄道信号設備における輸送障害事例を示す。378 件の事例において、機器故障や自然災害は、それぞれ 42 %と 32 %である。図 3.9 に、自然災害の内訳を示す。このうち、雷害は 83 %であり、最大の原因である。したがって、列車の安全運行のためには雷害対策は極めて重要である。図 3.10 は、落雷により故障した機器を示す。踏切に関連する機器（障検制御器、特発制御器、制御子）の和が全体の約 3 割を占め、次にインピーダンスボンド内のキャパシタ損傷が 7 %である。本論文では、早急に対策を取る必要がある踏切機器の雷障害に大なる影響を及ぼす接地と、インピーダンスボンドに内蔵されているキャパシタ焼損に焦点を当て 8 章で検討する。

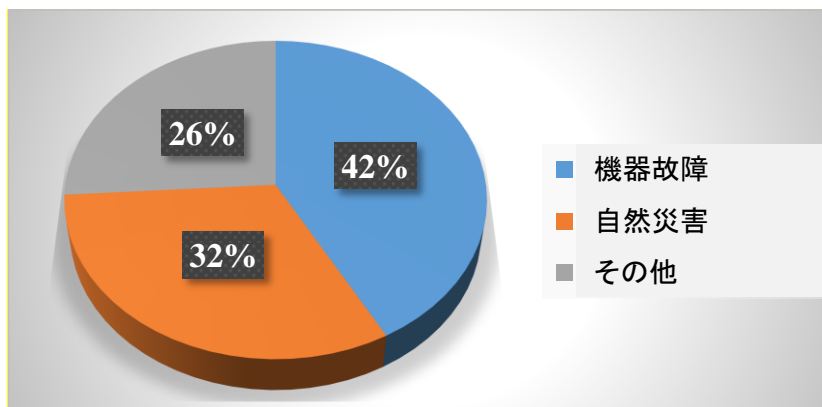


図 3.8 鉄道信号設備における輸送障害の原因

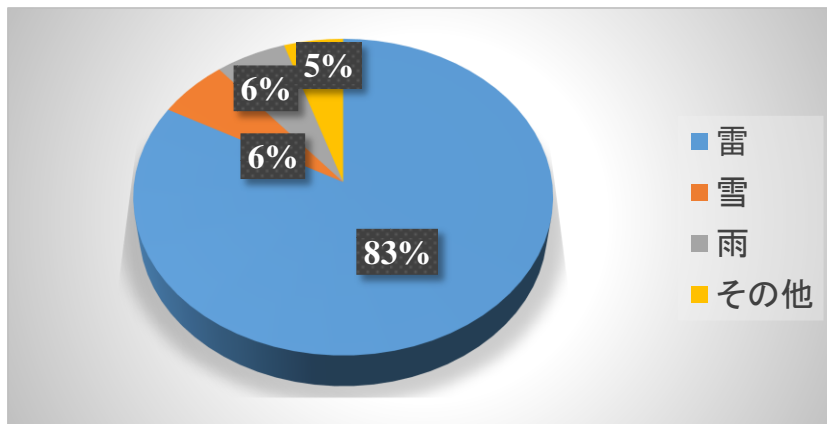


図 3.9 自然災害の要因

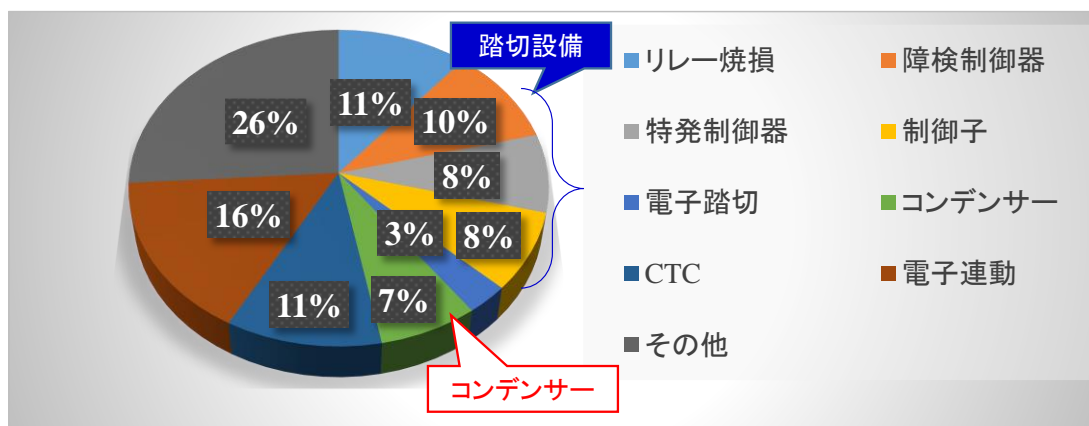


図 3.10 雷害により損傷した機器

3.5 雷害のリスクアセスメント

文献(6)によれば、鉄道用電力供給システムの故障内訳のうち、5年間の故障に対する雷害事例は2%であるが、電車線に関する雷害が原因で列車の安定運行に与える事例は8%との報告がある。これは、雷害に伴う設備故障が一度発生すると復旧には多大な時間を要することを示している。そこである鉄道事業者では、さまざまに発生する事象について、リスクアセスメントの取組みを進めている。リスクアセスメントとは、「安全に関する情報をもとに、最悪の事態に至るシナリオを想定し、その危険度を評価し、優先して対処すべきリスクに対して低減策を講じることにより、リスクを抑え込むこと」である。前節に記載の通り、雷害は一度発生するとその影響は大きいため、このような取組みを進めることは非常に重要である。

そこで、この鉄道事業者の営業エリア内の電気設備を対象に検証する。図 3.11 は、雷害発生に伴う被害額および輸送への影響を示している。図 3.11 の右上方はリスクを低減する処置をとるべき領域を示す。電気設備は、変電所等を構成する変電設備、列車が走行する沿線設備である電車線・配電線設備、駅設備等の電灯負荷設備および信号機器に分けられる。同図から、変電設備における雷害発生頻度は少ないが被害額や輸送への影響は大きくなる傾向がある。一方、信号機器における雷害発生頻度は高く、その影響範囲は大であるため、事前のリスクアセスメントが必須である。

本論文では、電気鉄道用設備の耐雷性強化に必要な、実測およびシミュレーション技術導入に関して検討を加える。

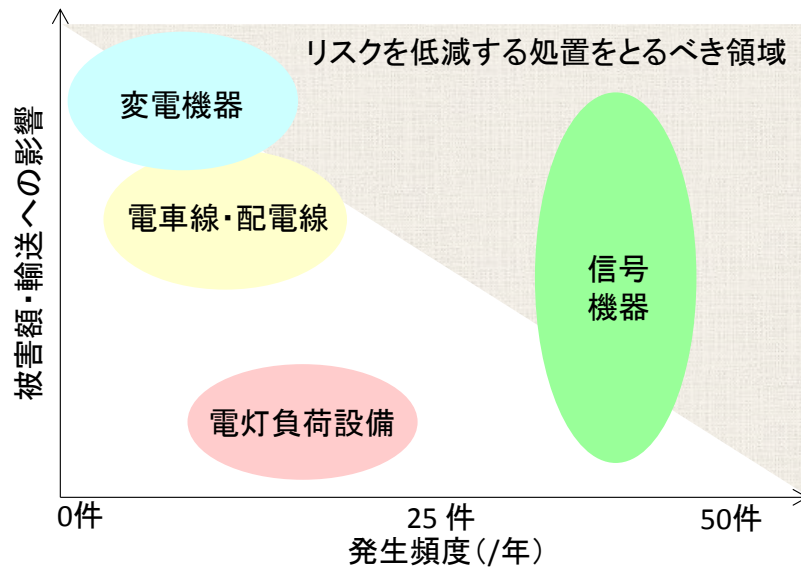


図 3.11 雷害発生に伴う被害額および輸送への影響

4章 接地抵抗測定

4.1 はじめに

雷害対策の最も基本的事項は、良好な接地を得ることである。在来線直流電鉄用変電所における接地抵抗値は、ある鉄道事業者の電気設備設計施工標準では $5\ \Omega$ 以下、遠制御接地は電気鉄道絶縁事故防止研究委員会の推奨により $20\ \Omega$ 以下とされている。変電所接地網の接地抵抗測定は、文献(11)発変電規程第6-3条に「(前略) 広い面積にわたる網状接地の接地抵抗は、電圧降下法によって測定することが望ましい」と記載されているように、変電所接地網のような広大な面積にわたる網状接地の接地抵抗を測定する場合は、電圧降下法による測定が大前提となっており、振幅 $20\ \text{A}$ 以上の商用周波数電流を使用し測定する。しかし、大規模な変電所接地網、連接接地などの接地抵抗を測定する際、電圧降下法では、測定電極の遠方配置や大電流を供給し得る電源装置が必要で、測定が大掛かりになることから、頻繁に実施することは困難である。そこで、接地抵抗の維持管理のため、商用周波数と異なる周波数数百 Hz 、振幅数十 mA 程度の電流を用いた簡易接地抵抗計を使用する場合もある。簡易接地抵抗計は、高周波かつ小電流で測定するため、必ずしも精度の高い接地抵抗値が得られるとは限らない。したがって、簡易接地抵抗計は電圧降下法により正しく測定された接地抵抗値が既知であり、それを維持・管理する上で測定する場合に限り使用されている。また、簡易接地抵抗計による測定では、測定原理・方法を正しく理解していないため誤差が増大する場合があります、十分注意が必要である。この誤測定値が記録され、以降の接地回路の維持・管理が困難となる場合がある。

そこで本章では、大規模な接地に対し、簡易接地抵抗計を使用する場合における接地抵抗測定方法の留意点について述べる。一般的に電鉄用変電所の接地抵抗は、変電所新設時は電圧降下法により測定される。経年変化に伴う健全性確認のために数年に一度接地抵抗測定が行われるが、このときの測定には、簡易接地抵抗計が使用される場合が多い。そもそも、簡易接地抵抗計は接地網といった広範囲にわたる対象物の接地抵抗を測定するものではなく、本計器を用いた測定では開業当時の値と比較し、高い値を示す場合がある。これは、測定用の接地極の打設位置が測定結果に大きな影響を及ぼすことに起因する。本章では従来の電圧降下法による測定法について述べ、次に簡易接地抵抗計を用いて広範囲にわたる測定対象物の接地抵抗を測定する場合であっても、高精度な接地抵抗値を得ることができる手法について記述する。

4.2 従来簡易接地抵抗測定法

接地抵抗は、定量的に次のように定義⁽¹⁵⁾される。「1つの接地電極があって、これに接地電流 $I[\text{A}]$ が流入すると、接地電極の電位が周辺の大地に比べて $E[\text{V}]$ だけ高くなり、このときの電位上昇値と接地電流の比 $E/I[\Omega]$ をその接地電極の接地抵抗という」(図4.1)。この定義によると接地抵抗の測定に接地電極に接地電流を流すための補助電極および接地電極の電位を測定するための基準点が必要となる(図4.2)。これらの条件が満足されて始めて接地抵抗値を求めることができる。

図4.3に電圧降下法による測定回路を示す。電圧降下法による測定では、電流補助極は接地網の一辺の長さの4~5倍、電圧補助極は接地網から $300\sim 600\ \text{m}$ 離す必要がある。また、電源から注入する電流は商用周波数($50\ \text{Hz}$ もしくは $60\ \text{Hz}$)で $20\ \text{A}$ 以上が推奨される⁽¹¹⁾。しかしながら電鉄用変電所は狭小な用地に建設される場所が多く、新設時以外は電圧降下法を適用することは極めて困難である。簡易接地抵抗計は数十 mA 程度の小電流で測定することから電位上昇がわずかであるこ

とから、商用周波数成分の誘導による影響を避けるため数百 Hz 程度の電流を注入する。電鉄用変電所接地網の接地抵抗は、変電所使用開始前の検査において電圧降下法により測定し、これを管理値としている。その後、その値を維持・管理するため、個別検査時に簡易接地抵抗計を用いて接地抵抗の値を確認することがもつばらである。しかし、以下に示す測定原理を理解せずに簡易接地抵抗計を用いた場合、正しい測定ができていないことが考えられるため、測定方法について十分確認することが必要である。

図 4.4 (a)に簡易接地抵抗計による接地抵抗測定例を示す。電気鉄道事業者においては、一般に簡易接地抵抗計は、高压配電線の避雷器接地に用いられる接地極を主な測定対象としている。そのため、測定対象物に対して十分に離れた位置に電圧補助極 (P 極) および電流補助極 (C 極) を配置した場合には確からしい接地抵抗を得ることができる。このときの電位曲線は図 4.4 (a)のようになる。電源から一定の電流 I [A] を接地極に流入させ、そのときの接地極の電位 V [V] を計測している。接地抵抗は $R = V/I$ [Ω] で算出することができる。図 4.4 (a)のように定電流を流した場合の電位分布は電圧降下法による電位分布と相似となるため、ノイズの混入を無視すれば電流によらず接地抵抗 R を得ることができる。

一方、補助極 (C, P 極) 配置が不適切な場合の測定例を図 4.4 (b)に示す。前述と異なり、電流補助極による電位変動と測定対象の変動領域が重なり電位分布は一定にならない。このような電位分布では、電位差 V が補助極位置に依存するため正確な接地抵抗値を得ることができない。

ここで注意すべき点は、簡易接地抵抗計に付属する電極では電流および電圧補助極を対象物からそれぞれ 20 m, 10 m に配置できる接地極等に限定される。変電所接地網は大小あるが、一辺の長さが 20 m×30 m の場合、簡易接地抵抗計による変電所接地網の接地抵抗測定は極めて限定的となる。

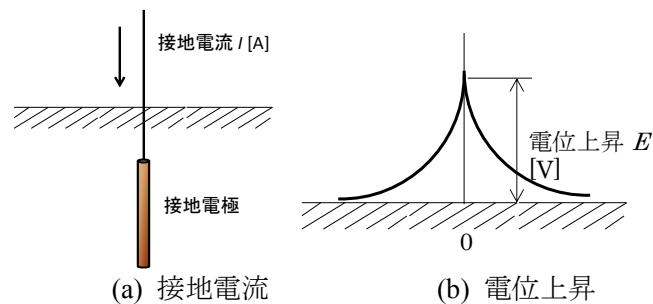


図 4.1 接地抵抗の定義

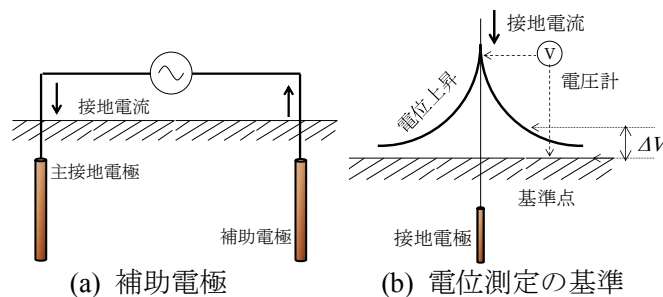


図 4.2 測定の基準点

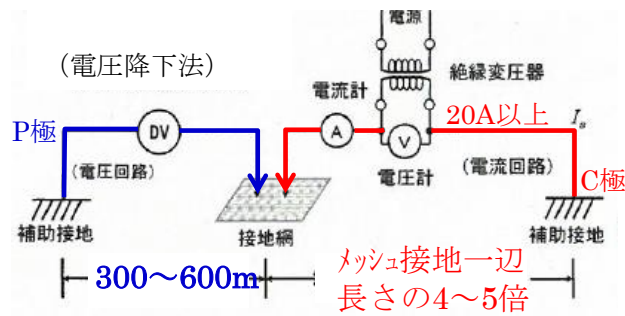


図 4.3 電圧降下法

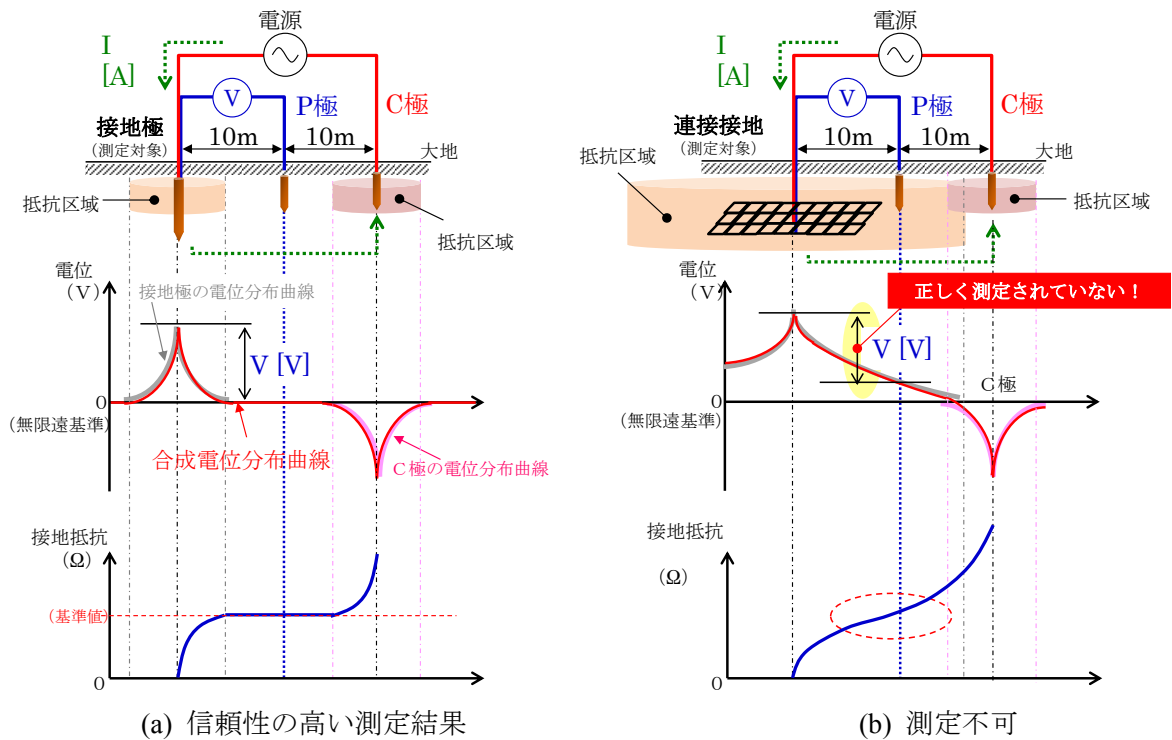


図 4.4 簡易接地抵抗計による接地抵抗測定例

4.3 簡易接地抵抗計を用いた高精度接地抵抗測定手法の提案

前節で示すように、変電所接地網の接地抵抗は電圧降下法による測定が大前提であるが、変電所から数百 m 離れた位置に補助極を打設することが難しい現状を踏まえ、簡易接地抵抗計を用いたより確からしい測定法について検討した。図 4.5 に簡易接地抵抗計を用いた測定回路を、図 4.6 (a) に簡易接地抵抗計を用いて確からしい値を得ることができた例を示す。まず初めに接地網端の E 極を基準とし、C 極を変電所接地網から 120 m 離れた位置に固定し、P 極の位置を 0~115 m の範囲で変更した場合の測定結果を示す。測定結果から、P 極位置が 40~80 m の範囲において、接地抵抗すなわち電位分布曲線が一定になっていることが確認できる。これにより、測定値約 4.5 Ω が得られる。なお、この変電所の電圧降下法による測定結果は 4.73 Ω であるため、概ね妥当な結果が得られる。

図 4.6 (b) は、E-P-C 間の相互距離を 10~50 m の範囲で変更した場合の測定結果である。測定器の推奨である距離を 10 m とした①で示す配置を採用すると、接地抵抗値は、8.5 Ω となり規程値 (5 Ω) を超過する。そこで、②~⑤のように E-P-C 間の相互距離を 20 m, 30 m, 40 m, 50 m と離して測

定を続けると、測定器推奨条件では正確な値が得られないことが明らかである。同様の測定方法で C 極に近い位置から P 極を E 極方向に移動させた場合、図 4.6 (a)より E-P 間の相互距離が 115 m の場合の測定結果は 17.4Ωとなり、真の接地抵抗と大幅に異なる値が得られる。

このように、簡易接地抵抗計を用いて、広範囲にわたる対象を測定する場合は、補助接地極の位置を変更して、数回測定を行い、接地抵抗値が一定な値であるか否かを十分に確認することにより正確な接地抵抗値を得ることができる。

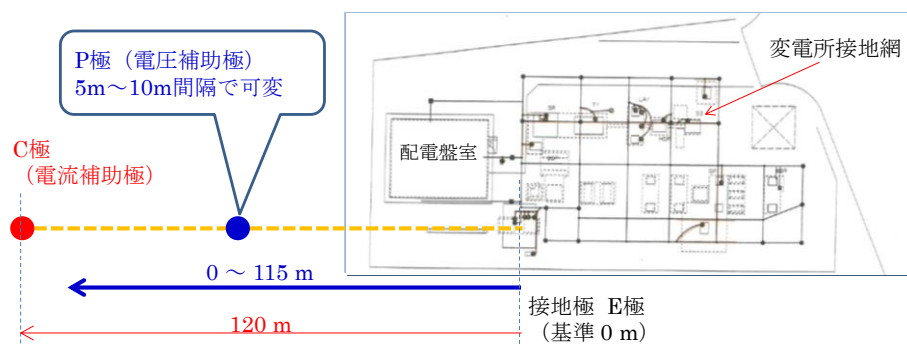
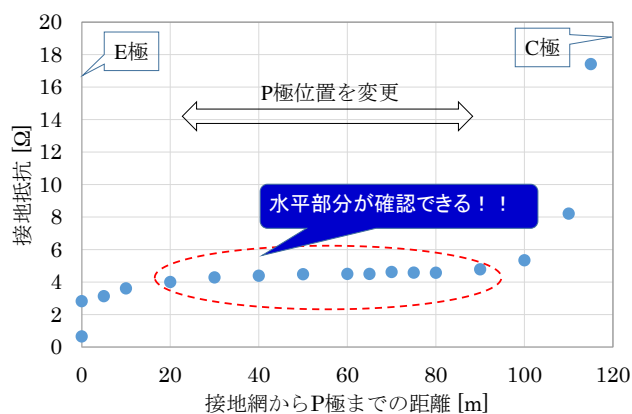
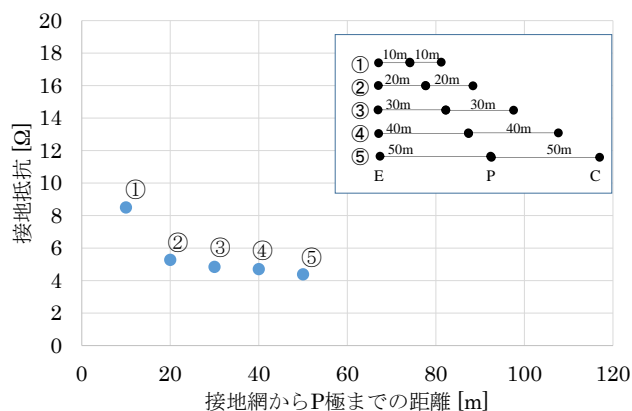


図 4.5 簡易接地抵抗計を用いた高精度な接地抵抗測定例



(a) E-P 間変動, E-C 間 120 m に固定



(b) E-P-C 間変動

図 4.6 接地網と P 極間距離を変えた場合の接地抵抗値

変電所の接地抵抗測定は、文献(11)にあるように、電圧降下法による測定が基本である。しかしながら、接地抵抗管理等のため簡易接地抵抗計を使用する場合は、測定器の仕様に従った従来法による手法では正確な測定値が得られない可能性があるため、本章で提案したように補助極の位置を変え、数箇所測定した結果を基に電位分布曲線を描き、水平部分があるか否かを確認する手法が有効である。補助極を打設する箇所は、変電所周囲環境への配慮が必要であるが、極力列車進来の影響を最小限とするため、線路と水平方向よりも線路に対し直角方向が推奨される。しかしながら、やむを得ず補助極を線路と水平方向にしか打設できない場合であっても、列車進来が測定値に影響することはないとの報告⁽¹³⁾もあり、提案法によれば十分信頼のおける測定値が得られる。

また、変電所接地網に限らず、図 4.7 に示すような線路沿線の接地装置（打込式接地極）を対象とする測定では、図 4.7 に示す打込電極と同じ B 方向に測定線を延線すると、埋設された連接接地が影響⁽¹⁴⁾し、正確な接地抵抗値を得ることができない。したがって、打込電極と反対となる A 方向に補助極を打設し測定線を延線する必要がある。

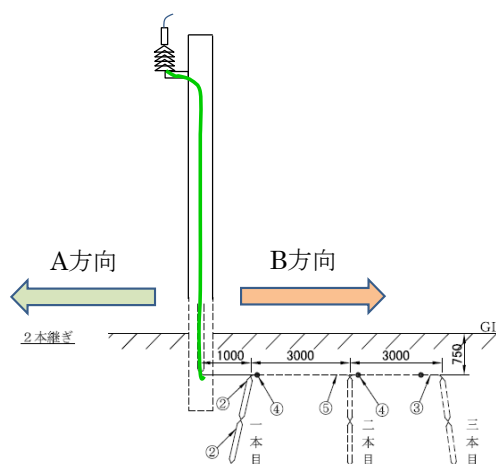


図 4.7 打込式接地極接地装置

4.4 変電所接地網の接地インピーダンスの周波数特性測定

本節では、電鉄用変電所の接地網の周波数特性試験について検討する。図 4.8 に測定対象とした在来線直流電鉄用 T 変電所を示す。この変電所は、旧国鉄時代の設計施工標準に従い設計されている。立地場所は、川沿いの水田地帯であり、大地抵抗率は $295 \Omega\text{m}$ であった。これは、表 4.1 より粘土質砂地に分類される。



(a) 受電と反対側から撮影



(b) 受電側から撮影

図 4.8 在来線直流電鉄用 T 変電所

表 4.1 土の種類とその抵抗率

土の種類とその抵抗率	抵抗率 [$\Omega \cdot m$]
沼沢地および泥地	80 ~ 200
粘土質砂地	150 ~ 300
砂地	250 ~ 500
砂岩および岩盤地帯	10000 ~ 100000

文献(15)より抜粋

測定対象の変電所接地網は 30 m×20 m で構成されている。電流注入点は接地網のほぼ中心とし、接地網端部から遠方 50 m の位置に電圧の基準とする補助電極、さらに 40 m 遠方に電流の基準となる補助電極を打設して測定した。測定は、周波数特性を得るため NF 回路ブロック製パワーアンプ 4502 を用いて電流を注入し、周波数を変化させ注入点電圧を測定する手法、および測定周波数 820 Hz の簡易接地抵抗計 EY200 (横河) により測定した。

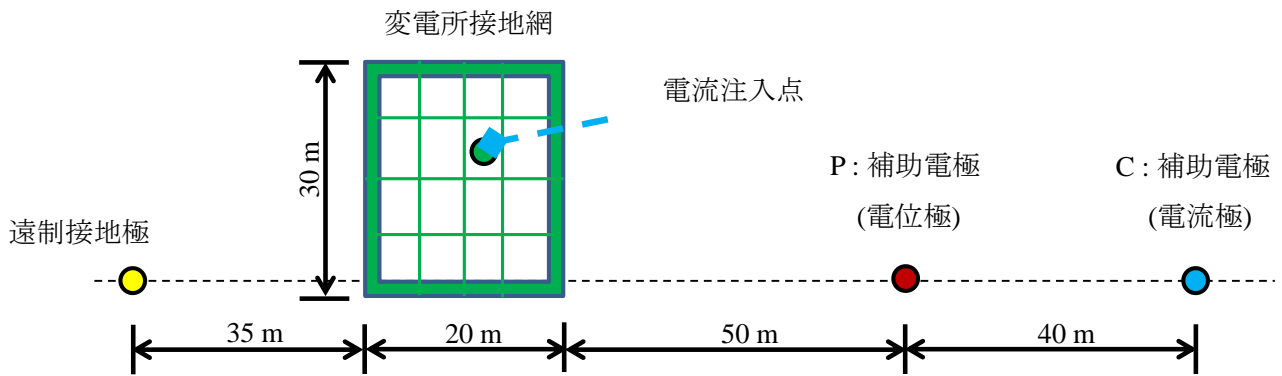


図 4.9 補助電極の配置

測定結果を表 4.2 および図 4.10 に示す。当該変電所は、1983 年の電化工事と共に運用開始し、運用開始時に実施した商用周波数による電圧降下法による接地抵抗測定結果は $4.9\ \Omega$ であった。パワーアンプ 4502 からは、周波数 200, 500, 1k, 2k, 5k, 10k, 20 kHz の電圧を印加した。表 4.2 には簡易測定器横河 EY200 の測定周波数 820 Hz である結果と比較するため、パワーアンプを用いた電圧印加法による測定結果はこれと近い 1 kHz の値を示す。これらの結果は、運開当初の電圧降下法により商用周波数 60 Hz にて測定した値とほぼ一致している。

次に、図 4.10 に示す接地インピーダンスの周波数特性から 2 kHz 程度までは、約 $5\ \Omega$ と一定の値である。しかしながら、これより高い周波数領域である 10 kHz 以上ではインピーダンスが概ね周波数に比例する。これは、変電所接地網の接地インピーダンスは周波数に応じて変化し、高周波領域では誘導性を示すことを示している。通常、変電所の接地抵抗値は、商用周波数領域の値をもって管理している。一方、鉄道事業者は、これまではそれよりも高い周波数領域における値、すなわち接地インピーダンスについては管理してこなかった。雷サージの検討には 10 kHz 程度から時に数 MHz 程度の周波数成分も考慮する必要があるため、雷サージ対策を施すには、接地インピーダンスの周波数特性を把握することが重要である。雷害による機器故障等を防止するためには、この過渡的な接地抵抗すなわち接地インピーダンスの管理に注目しなければならない。なお高周波領域の接地インピーダンスについては 10 章で検討する。

表 4.2 接地抵抗測定結果

測定法	周波数 [Hz]	接地抵抗値 [Ω]	備考
電圧印加法	1000	4.98	4.9 Ω (1983 年) 電圧降下法による
横河 EY200	820	5.09	

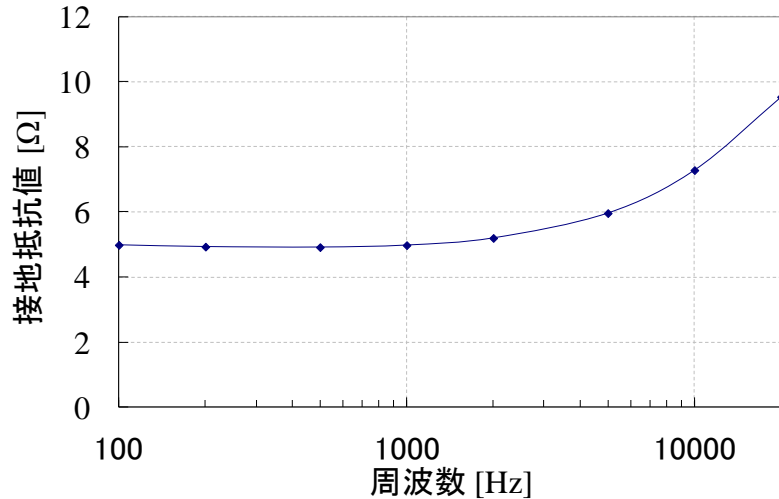


図 4.10 接地抵抗の周波数特性

4.5 まとめ

在来線直流電鉄用変電所における接地抵抗値は、変電所開業時は電圧降下法により測定しているが、定期的な検査では簡易接地抵抗計を使用しているのが現状である。変電所接地網および連接接地のような大規模接地に対する接地抵抗測定は、電圧降下法により測定することが基本であるが、開業時と比較し変電所周辺環境の変化に伴い大規模な測定が困難な場合が多々ある。このため、やむ終えず簡易接地抵抗計を使用する場合があるが、信頼性の高い測定結果が得られない。そこで、本章では簡易接地抵抗計を使用した場合であっても精度の高い測定結果が得られる手法について検討した。具体的には、簡易接地抵抗計を使用した場合であっても、電流補助極を 100 m 程度遠方に配置し、電圧補助極の位置を変えて数回測定することにより信頼性のある接地抵抗値を得られることを現地試験により確認した。

次に、変電所接地網のインピーダンス周波数特性を測定した。測定結果から、低周波領域ではほぼ一定であるが、5 kHz 以上の高周波領域では急峻に高くなり雷サージに対しては従来の低周波に対する接地抵抗の管理では不十分であることを示し、過渡的な接地特性を定めるインピーダンスによる管理も必要になることを明らかにした。

5章 電鉄用変電所接地網の雷サージ特性実測

5.1 はじめに

3章では鉄道における雷害事例として、電力および信号設備の故障の具体例を示した。また4章では、接地抵抗の管理について、雷害対策を講じるには、定常の接地抵抗値を管理するだけでは十分ではなく、過渡的な接地特性を定めるインピーダンスの周波数特性による管理も必要になることを示した。このように電気鉄道用電気設備の設計・管理は主に定常状態である直流あるいは商用周波数に対するものがほとんどで、耐雷性に関しては管理手法も含め、これまで十分な対策がなされてきたとは言い難い。

一方、電力系統では安定に電力を供給するため雷サージの実測ならびに数値解析に基づき対策がなされている。これは多雷地区に、高構造物である鉄塔を有する送電線があるためである。電力系統と異なり、電気鉄道用電気設備は、比較的低い位置に設置されているが、これら送電線から受電している電鉄用変電所も多数存在する。これが電鉄用変電所の雷害の一因であるが、この他にも電気設備の構成部品が技術の進歩とともに新しい設備に変わりつつあることが関係していると考えられる。例えば、変電所の変電設備を保護する継電器もその一つである。従来は、誘導円盤型のように機械的な接点を持つ保護継電器が使用されていたが、近年は静止型が主流である。このように新しい設備に変わりつつあるが、研究の礎となる実測は鉄道事業者を含め、あまりなされていない現状にある。また、実測した例はあっても、社会インフラ設備を支える設備の詳細を一般的に公表することは難しいことから情報は限られている。しかしながら、実測は数値解析法の開発にとっても極めて重要である。

以上から、本章では電鉄用変電所に雷撃があった場合の様相を明らかにするために、変電所接地網への模擬雷注入によるフィールド試験を実施した。き電側および受電側の避雷器が動作した直後に、避雷器から接地網に接続される接地線を介して急峻な雷電流が流入する。この状況を評価するために、避雷器接地端子にパルス電流を注入したときのサージインピーダンスを求めた。

5.2 サージインピーダンスと接地系電位分布の測定方法

在来線直流電鉄用I変電所を対象に接地サージインピーダンスおよび接地系電位分布を測定した。サージインピーダンスは、元来分布定数線路に沿って伝搬する進行波の周波数領域の電圧と電流の比として定義され⁽²⁷⁾、特性インピーダンスとも呼ばれる。厳密には周波数を無限大に近づけた場合の特性インピーダンスの収束値をサージインピーダンスと呼ぶが、これらのインピーダンスは、特別な条件の下では同じ値となる。例えば、無損失分布定数線路の特性インピーダンスは、インピーダンスに虚部を持たないため、サージインピーダンスと理論的に等しくなる。なお、サージインピーダンスは、半無限長線路に電流を注入したとき（厳密には有効長線路で反射波が到来するまで）に生ずる電圧が、このインピーダンスに電流を乗ずることにより得られることから命名された。

また、サージインピーダンスは、分布定数回路で使用されるだけでなく、集中定数回路過渡現象を解明する分野でも時間領域で幅広く使用されているが、実数で表されるサージインピーダンスの定義は明確ではない。例えば、過渡電圧・電流ピーク値の比とする方法、ステップ状電流を注入したときの電位のピーク値をその時点での電流値で除する値として定義する方法⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾、測定した電圧を電流で時々刻々除して求める方法⁽³⁰⁾⁽³¹⁾、周波数変換法により単位関数電流に対する電圧時間応答最大値とする方法⁽¹⁸⁾⁽³²⁾など、サージインピーダンスには様々な定義がある。

鉄道分野の接地設計は、これまでの定常接地抵抗から、雷害発生に伴う過電圧評価のためサージインピーダンスによる評価に移行しつつある⁽³³⁾⁻⁽³⁵⁾。雷害リスクが過少評価されれば鉄道の安全運行に支障をきたし、過大評価されれば過剰な設備投資に繋がる可能性もあり、適正な定量的管理手法の確立が望まれている。

本章では、き電側および受電側の避雷器接地線にパルス電流を注入した時の避雷器接地線に発生する電圧波形を電圧プローブおよびデジタルオシロスコープで、電流波形をサージCTおよびデジタルオシロスコープで測定した。なお、電流注入点を避雷器接地線に選定したのは、変電所に避雷器が適切に設置されている場合であっても変電設備を完全に保護し得ない場合があるためである。これは、避雷器がもつ耐電圧以上の雷サージ電圧が避雷器に印加され、避雷器が動作した後に、避雷器から接地網に接続される接地線を通して急峻な雷電流が流入することを模擬する。電位分布測定については、パルス電流をき電側避雷器接地線、受電側避雷器接地線にそれぞれ注入した時の各測定対象機器接地系に発生する電圧波形を、接地網端部から120 m程度離れた位置に打設した電圧基準極との電位差として測定した。これは、4章で示したように接地抵抗を測定する対象物には抵抗区域と呼ばれる電位傾度が存在し、この影響を低減するためには遠方の地点電位を基準とする必要があるためである。図5.1に、サージインピーダンスおよび電位分布の測定回路を、表5.1に測定器仕様を示す。

図5.1において、制限抵抗(1 k Ω , 2 k Ω)は安定した電流を注入し得る様対象物のインピーダンスの影響を最小限に抑えるために挿入している。また、整合抵抗(300 Ω)は電流極で現れる注入電流進行波の無用な反射を抑えるために挿入している。電流・電圧極及び補助線敷設図を図5.2、補助線構内敷設図を図5.3、測定箇所図を図5.4、屋外接地系統図を図5.5、屋内接地系統図を図5.6に示す。測定した変電所は、30 kV受電、整流器用変圧器SR-Tr2台、整流回路は直列12相方式を採用している。また、この変電所がき電する線路は単線であるため、き電回線は上り、下りの2回線である。これらの変電設備機器が、12 m \times 89 mの細長い狭隘な用地に配置されている。なお、対象としたI変電所は、変電設備のコンパクト化を目的に作られた変電所であり、変電設備を構成する機器配置は省スペースである特徴を有する。この変電所の接地網端部から図5.2における上方線路と平行に120 m離れた位置に接地棒14 ϕ 1.5 m \times 2(連結式)3本を電圧極として打設した。また、図5.2における左側、線路と概ね直角方向に電圧極と同様接地網端部から120 m離れた位置に接地棒5本を電流極として打設した。

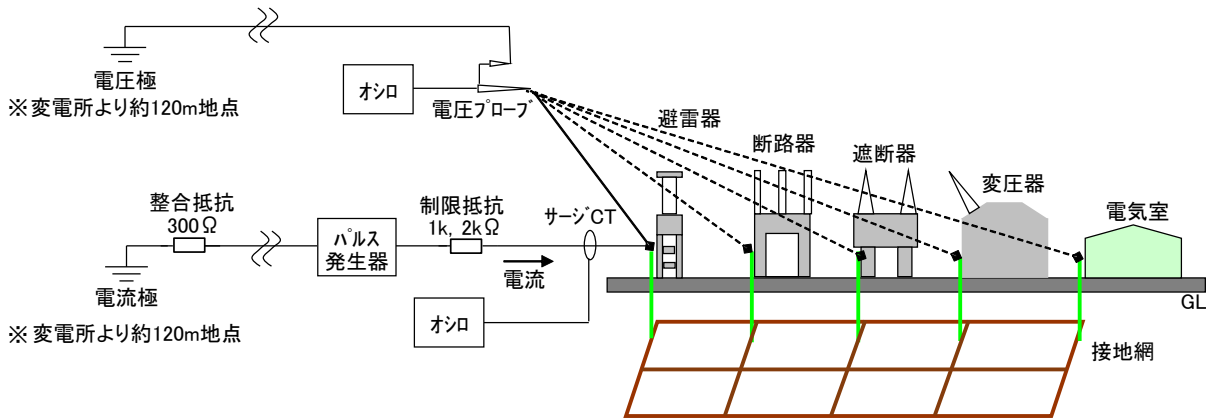


図 5.1 サージインピーダンス・電位分布測定回路

表 5.1 サージインピーダンス・電位分布測定における測定器仕様

測定器	主な仕様
パルスジェネレータ	最大出力電圧: 5 kV, 波形: 0.05/100 μ s 電源容量: 50 VA, 自動出力時間間隔: 10 s
デジタルオシロスコープ	型式: TPS2024, 最高サンプルレート: 2 GS/s 周波数特性: DC~200 MHz
電圧プローブ	型式: 700988, 減衰率: 10:1 周波数特性: DC~400 MHz, 最大入力電圧: 424 V _{rms} , 600 V _{peak}
サージ CT	型式: 2877, 出力: 1 V/1 A 立ち上がり時間: 2ns, 最大ピーク電流: 100 A オプション: BNC ケーブル (50 Ω), フィードスルー (50 Ω)

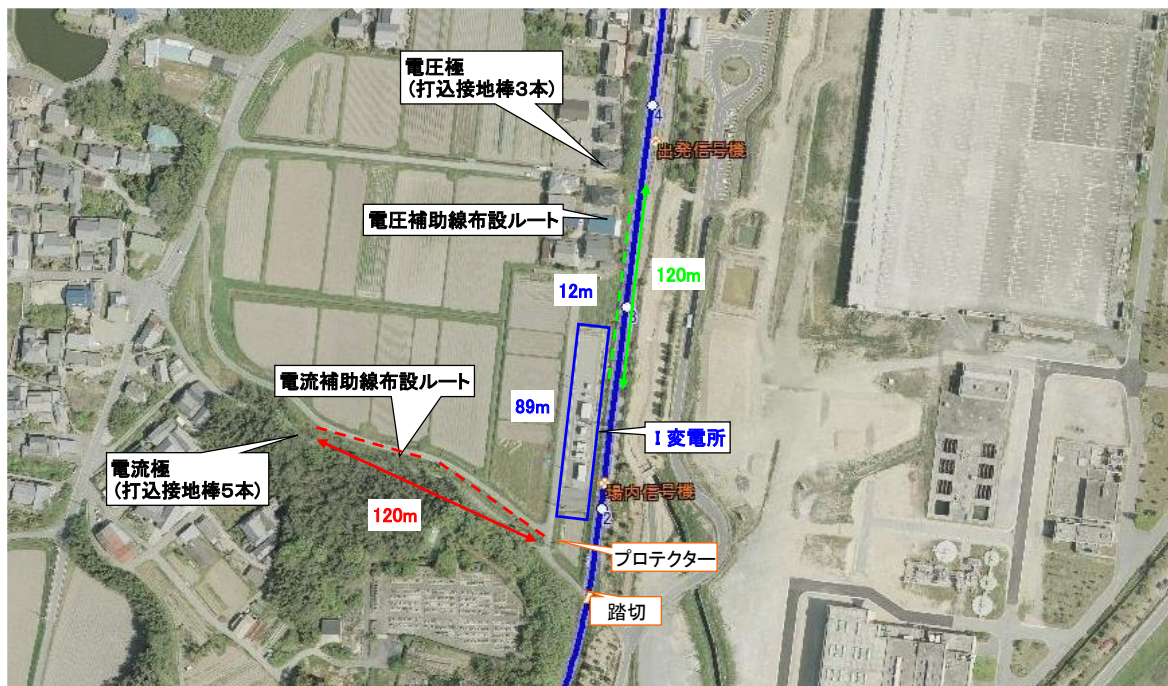


図 5.2 電流・電圧極及び補助線敷設図

図 5.3 のように電流補助線は変電所敷地境界に沿って敷設した。電圧極から延線した補助線は、図 5.4 に示す測定箇所まで延線した。図 5.4 において、赤印はパルス電流を注入した接地サージインピーダンスの測定箇所を示し、緑印は接地網電位の測定箇所を示す。パルス電流は、⑨き電側 11H キュービクル内の避雷器接地端子(11H, 13H), あるいは受電側②MOFキュービクル内に注入した。

接地網は、図 5.5 に示すように 2 本の接地線に対し、変電機器が設置されている箇所を近傍にて短絡するはしご型の構成である。これらの接地線には、軟銅より線 Cu 60 mm² を使用している。接地線と変電所敷地に設置されているフェンスとの離隔は 2.8 m 以上である。また、図 5.5 の下図は、遠方接地と呼ばれる通信設備用の接地線を示す。この接地線の埋設深さは 1.2 m であり、絶縁電線 IV 22 mm² を使用している。図 5.6 に示す屋内接地線は、外周は絶縁電線 IV 60 mm² で構成し、それと各機器の接地との間は IV 22 mm² を使用している。

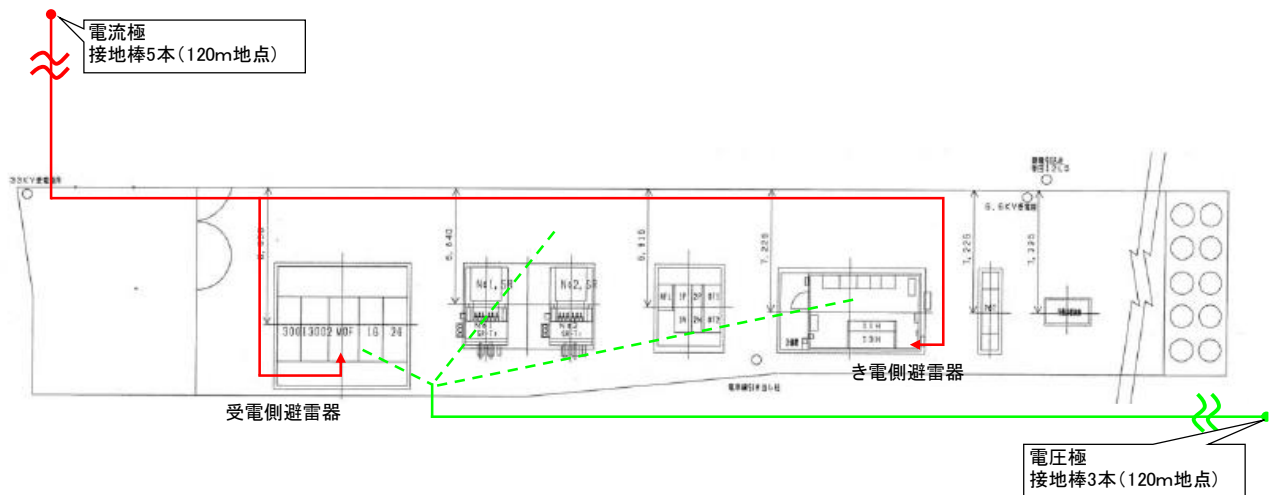


図 5.3 I 変電所補助線構内敷設

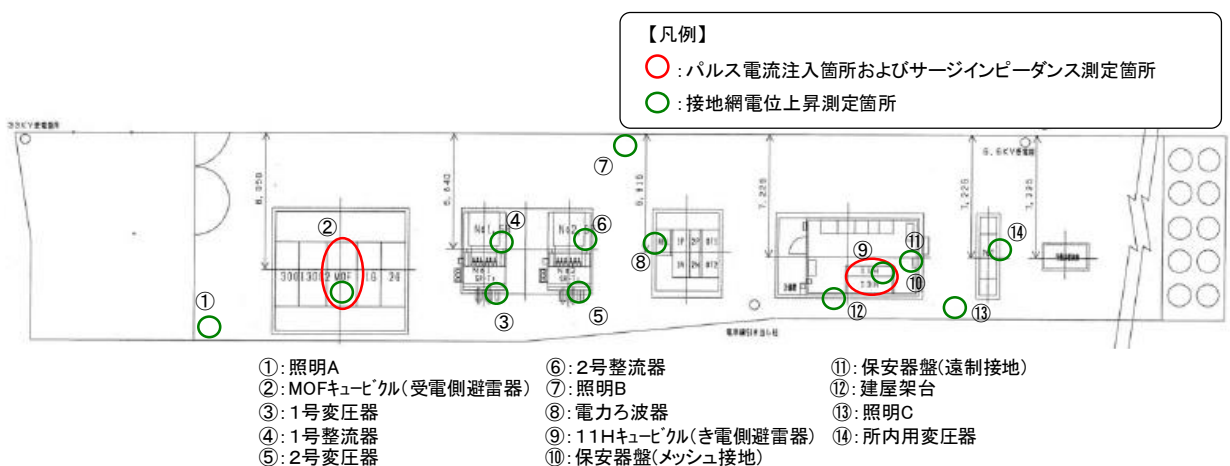
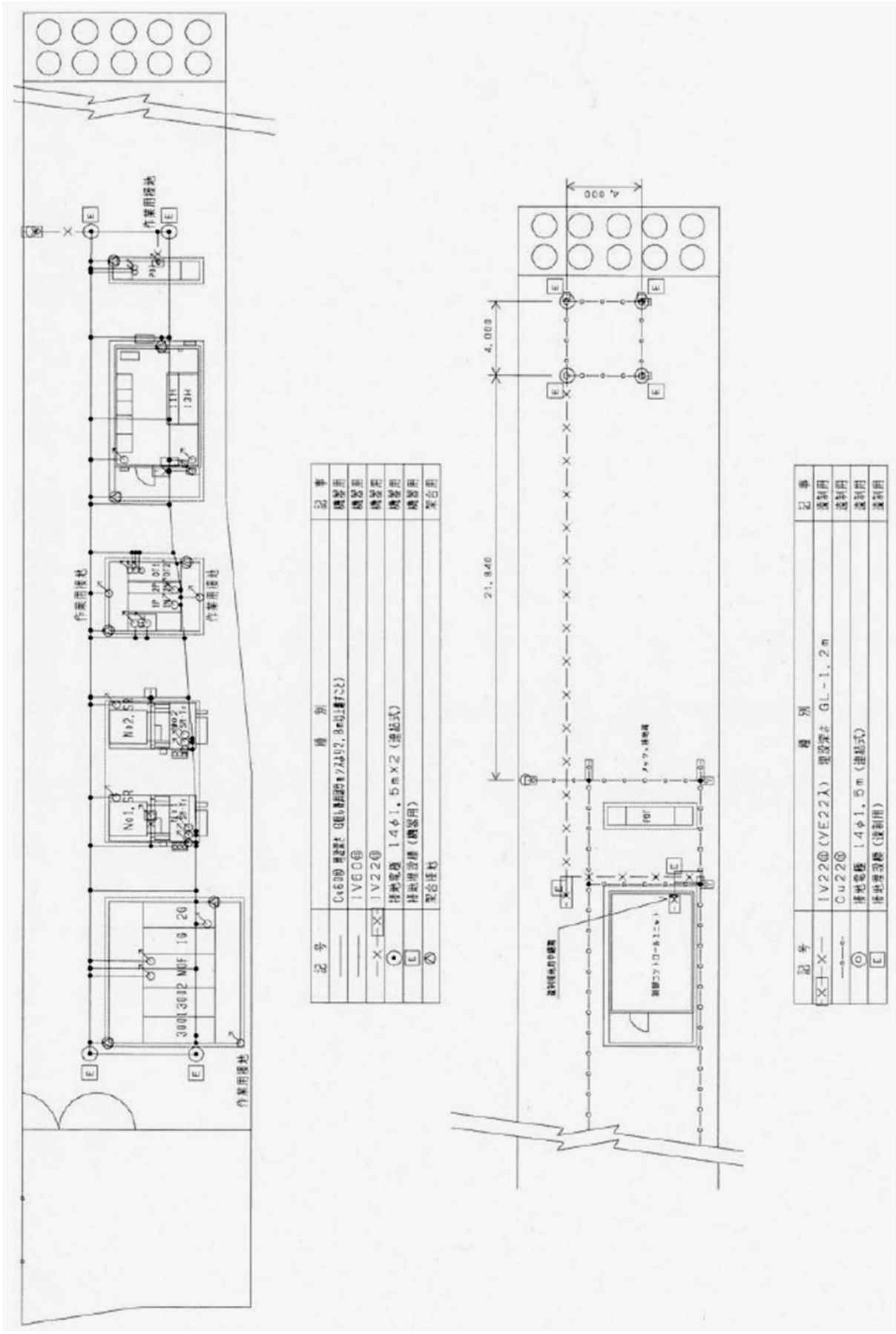


図 5.4 I 変電所測定箇所



記号	種別	記号
—	C4600 接地線 (電線規格φ7.5×12, 3m以下用)	機器用
—	IV600	機器用
—X—	IV220	機器用
○	接地電極 1.4φ1.5m×2 (連結式)	機器用
⊕	接地電極 (鋼管)	機器用
⊗	配合接地	架台用

記号	種別	記号
—X—	IV220 (VE221) 埋設深さ GL-1.2m	埋設用
—e—	Cu220	埋設用
○	接地電極 1.4φ1.5m (連結式)	埋設用
⊕	接地電極 (埋設用)	埋設用

図 5.5 I 変電所屋外接地系統

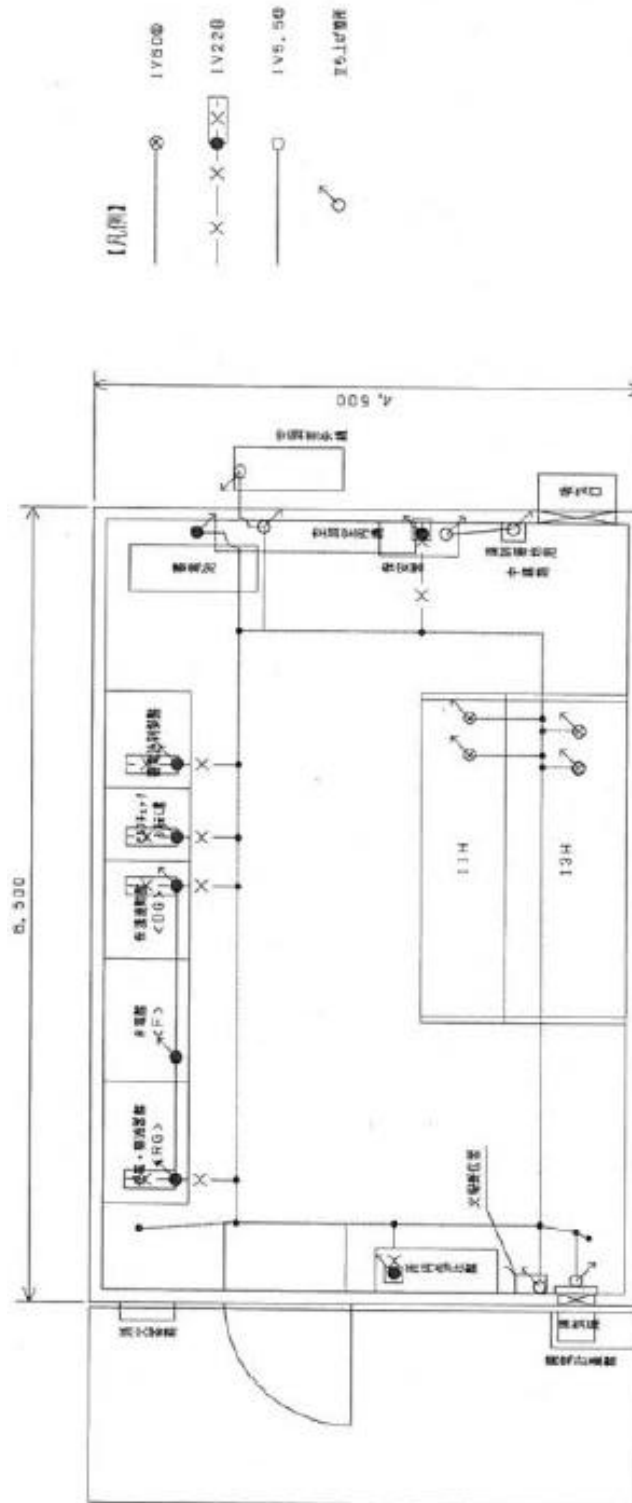


図 5.6 I変電所屋内接地系統

5.3 サージインピーダンスと接地系電位分布の測定結果

図 5.7 にき電側(⑨11H キュービクル)避雷器接地端子 11H, 13H に電流を注入した時の電流・注入点電圧を, 図 5.8 に受電側(②MOF キュービクル)各相避雷器接地端子電流注入時の電流および注入点電圧を示す。なお, サージインピーダンス欄は, 電圧波形を電流最大値で除したもので, 電圧波形と相似となる。

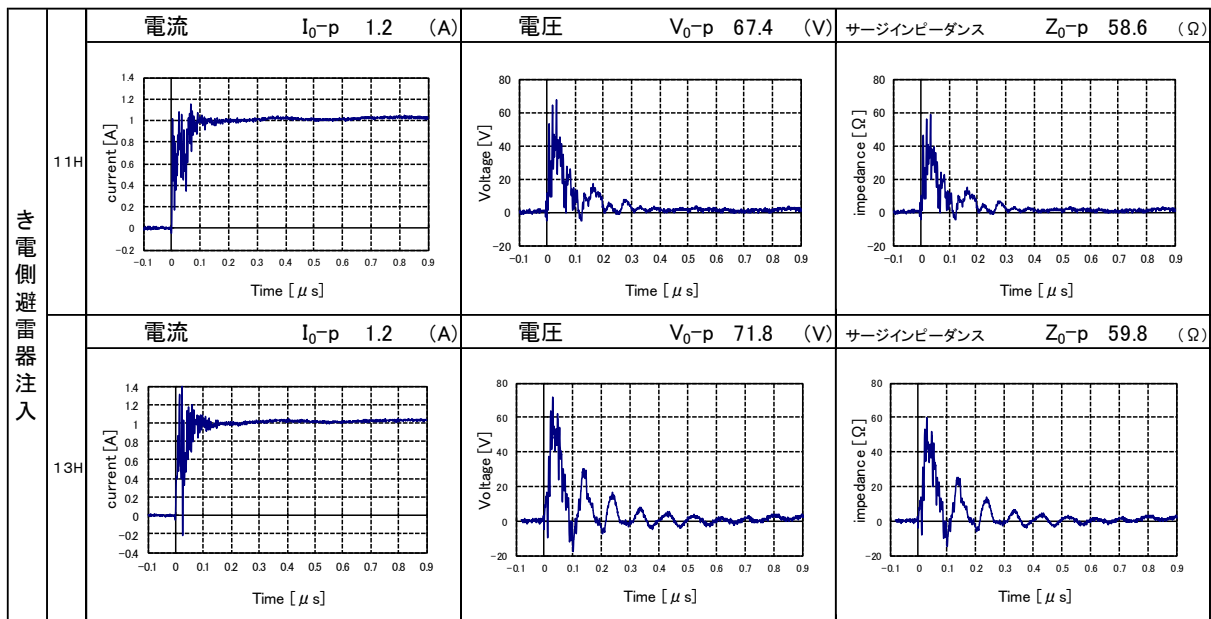


図 5.7 き電側(⑨11Hキュービクル)避雷器接地端子電流注入時の電流・注入点電圧

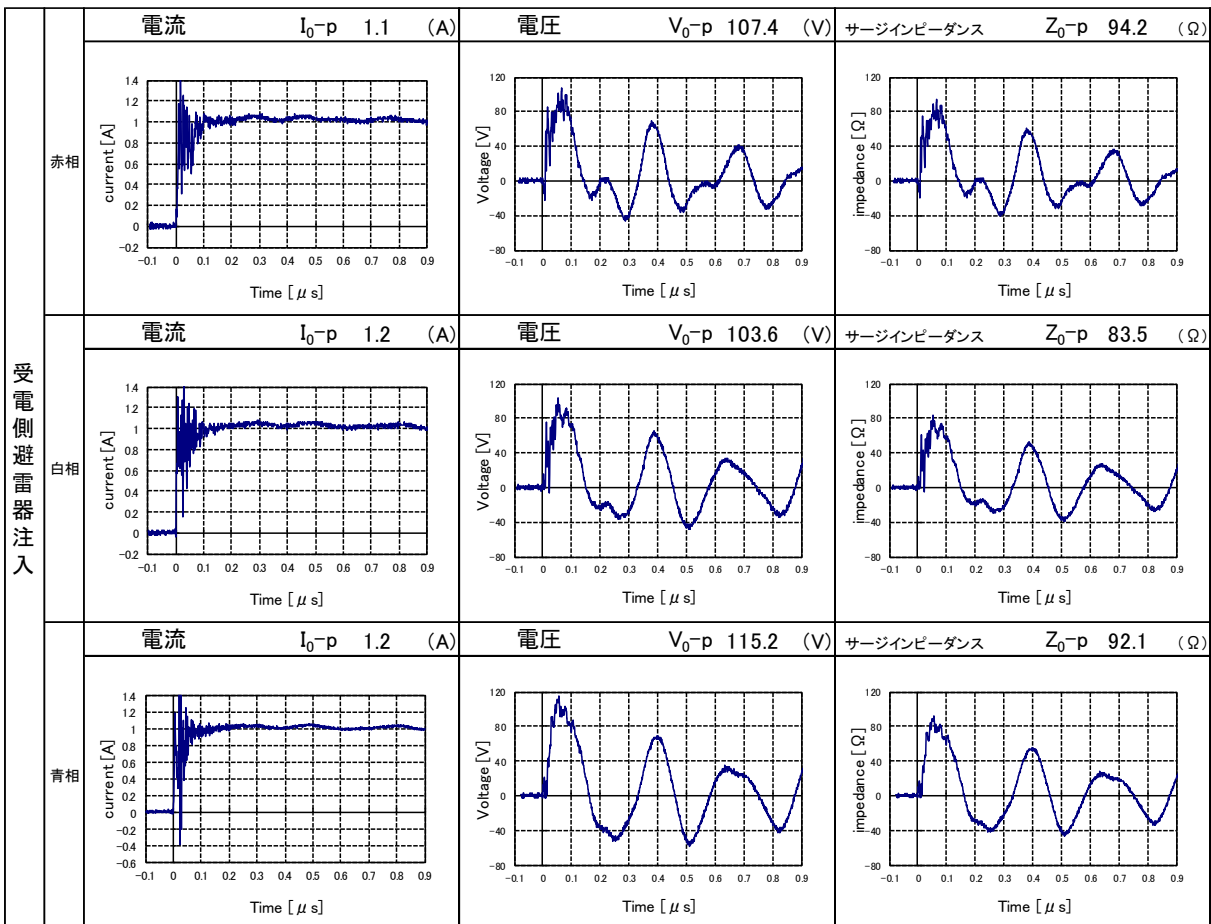
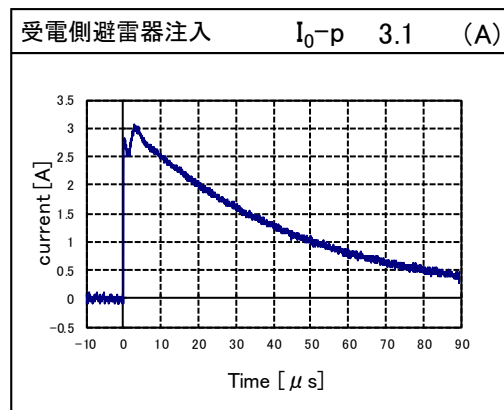
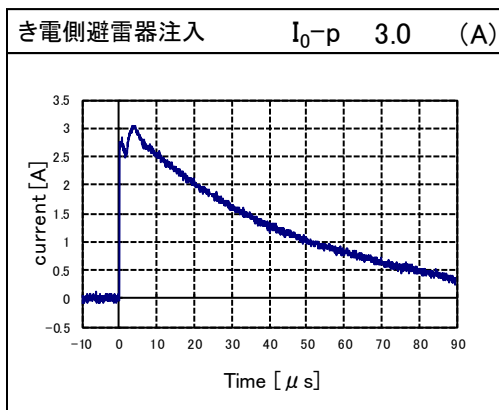


図 5.8 受電側(②MOFキュービクル)避雷器接地端子電流注入時の電流・注入点電圧

図 5.9 にそれぞれの注入電流の波尾部を含めた波形を示すが、図から明らかな様に、注入点による電流の変化はわずかで定電流注入が実現されている。図 5.7, 図 5.8 に示す電流波形からも明らかなように、注入電流波頭部はほぼ単位関数状である。

表 5.2 に各点に電流を注入したときの電位上昇最大値を、これより求めた各箇所のサージインピーダンスを表 5.3 に示す。このサージインピーダンスは、図 5.7, 図 5.8 に示す電圧の最大値を電流の最大値で除した値である。すなわち図 5.7, 図 5.8 に示すサージインピーダンス波形の最大値である。表 5.2 に示す測定値は、それぞれの測定点における測定結果を比較するため、一定時間経過し電流が安定した値を印加電流とし、電圧は測定電圧の最大値を採用した。なお、受電側注入時の赤相、白相、青相はそれぞれ R 相、S 相、T 相に対応する。今回測定した避雷器立上接地線のサージインピーダンスは、き電側で平均 59.2Ω 、交流側で三相平均 89.9Ω となった。き電側避雷器の接地線は、接地網から 11H, 13H それぞれの避雷器までの距離が同程度であるため、ほぼ等しい値となった。一方、受電側避雷器の接地線はキュービクル内における立上接地線引き回しにより白相と比較すると、赤相、青相の接地線長さは長くなり、これに従いサージインピーダンスも白相 83.5Ω 、赤相 94.2Ω 、青相 92.1Ω となった。以上のように、接地線長さがサージインピーダンスに与える影響は大きく、接地線を施工する場合は、極力変電所接地網との最短ルートを選定し接続することが望ましい。



(a) き電側避雷器注入電流

(b) 受電側避雷器注入電流

図 5.9 避雷器接地端子注入電流

表 5.2 電位上昇（サージインピーダンス）測定結果

測定箇所		測定端子	印加電流[A]	測定電圧[V]
き電側避雷器	11H	接地系	1.2	67.4
	13H	接地系		71.8
受電側避雷器	赤相	接地系	1.2	107.4
	白相	接地系		103.6
	青相	接地系		115.2

※測定電圧…数值：波形の V_0 -p 値

表 5.3 サージインピーダンス測定結果比較表

測定箇所		サージインピーダンス[Ω]	
き電側避雷器	11H	接地系	58.6
	13H	接地系	59.8
	平均		59.2
受電側避雷器	赤相	接地系	94.2
	白相	接地系	83.5
	青相	接地系	92.1
	平均		89.9

き電側，受電側それぞれに電流を注入したときの，各測定点における電圧波形すなわち接地網電圧分布を図 5.10，図 5.11 に，表 5.4，表 5.5 に最大電位分布を示す。図 5.10 より保安器盤（遠制）を除く，11H キュービクル，保安器盤（メッシュ），建屋架台では正方向，所内用変圧器は負方向にスパイク状の波形が観測される。この逆極性スパイク状電圧は，電流注入線をこれらの測定点の間に敷設したことにより説明でき，測定系の誘導現象によるもので，接地インピーダンス特性を表すものではない。

表 5.4 に示すき電側避雷器接地線（11H）電流注入時の接地系電位分布を図 5.12 に示す。図中の 11H キュービクルとは，き電側避雷器（11H，13H）を収納しているキュービクルの接地端子を示す。表 5.2 より注入点に 67.4 V の電圧が発生しているのに対し，この端子は電流注入点と最も近いが，発生電圧は約 5 V である。また，照明および保安器盤（遠制）を除き他の接地系電位は，概ね等しく，当変電所の接地網は等電位化が達成されていることを示している。なお，照明 A，B，C の電位は高く，波頭部に急峻なパルス状の波形が観測される。これは敷地の制約上電流注入線と電圧測定線がやむを得ず近接することになり，これによる誘導の影響と考えられる。

接地網における電位を示す図 5.10 より，注入点（11H キュービクル）で急峻な電圧波形は，遠方に至るほど緩波頭となり，波尾部では電位差がほとんど観測されない。これを明らかとするため，き電側避雷器（11H）注入時の各部電位波形を重ねて図 5.13 に示す。図より，メッシュ接地が施されている設備は波尾部において等電位化が形成され，保安器盤（遠制）については，他の施設と波頭部および波尾部共に他の波形とは様相が異なることから，個別接地であると判断できる。保安器盤（遠制）は通信設備のための接地であり，変電所接地網へ雷電流が流入した場合であっても，それが通信設備に影響してはならない。実測結果から，個別接地とすれば雷サージを低減し得ることが明らかとなった。

次に，受電側避雷器注入時の接地系電位分布を図 5.14 に示す。図の MOF キュービクルとは，受電側避雷器を収納しているキュービクル接地端子を示す。図 5.14 より，受電側注入時の接地系電位の内，電流注入点から最も近接した位置に設置された計器用変成器（MOF）キュービクルの接地端子において 20 %程度他点より電位が高く，遠制接地された保安器盤接地端子は 1/2 以下である。先のき電側避雷器（11H）電流注入と比して，電位がより低下しているが，これは波頭部の振動成分が小となったためである。その他の点の電位は注入点との距離が小となるとサージ電位は高くなる傾向を有するが，電位の差は概ね 5 %程度であり，顕著な差異は観測されなかった。すなわち等電位化が実現されている。なお，保安器盤（遠制）については，き電側注入時と同じく，他の接地電位と比して低い。MOF キュービクル内の受電側避雷器（11H）に電流を注入した時の各部電位波形を重ねて図 5.15 に示す。図 5.15 から，波形様相からき電側注入時と同様にメッシュ接地が施されている設備は等電位化が形成され，個別接地である保安器盤（遠制）については電位が低く，雷サージがき電・受電側いずれから侵入しても遠制接地の電位はメッシュ接地電位と比して上昇が抑制されることが明らかとなった。

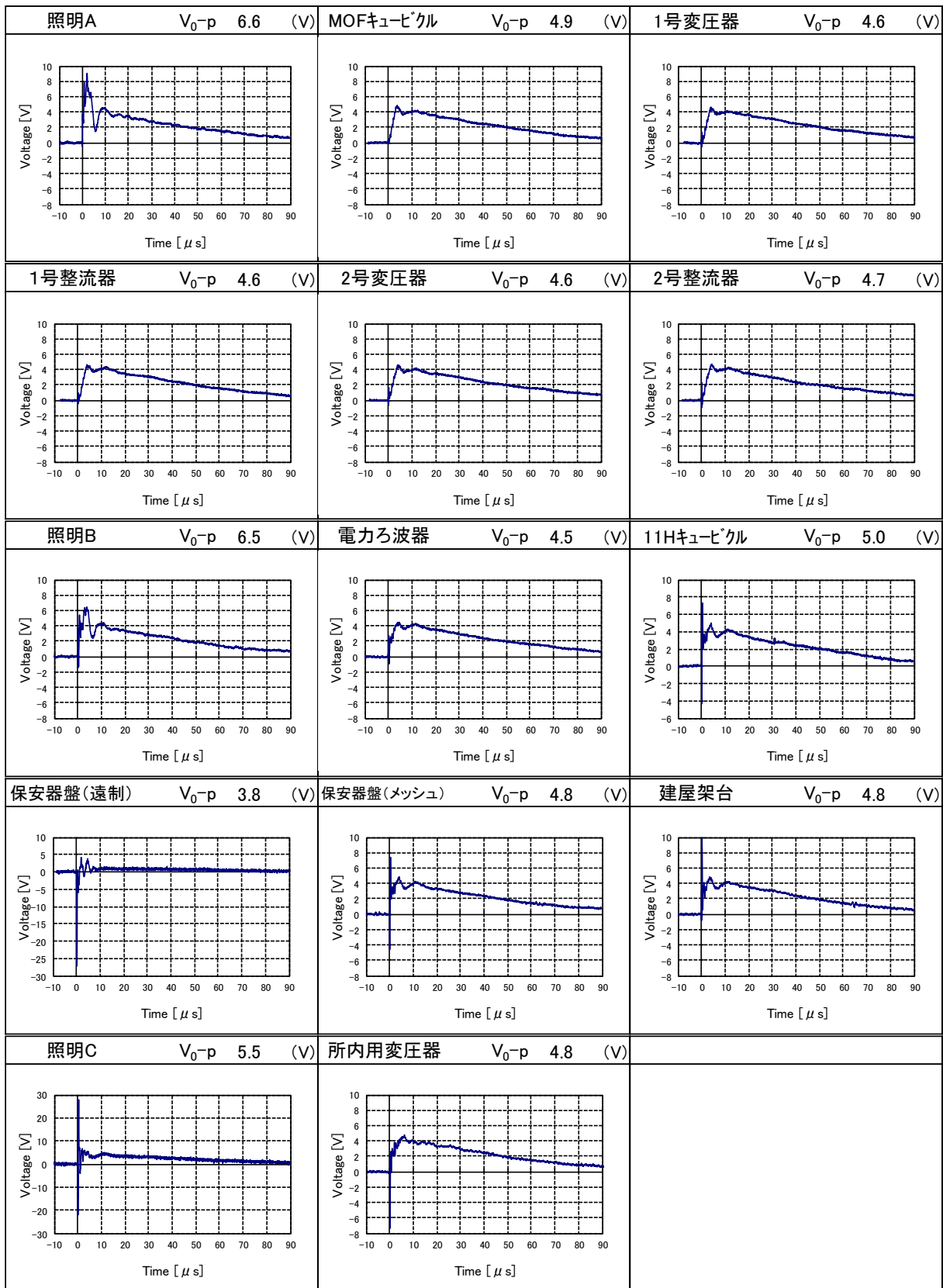


図 5.10 き電側避雷器注入時の測定点電位上昇

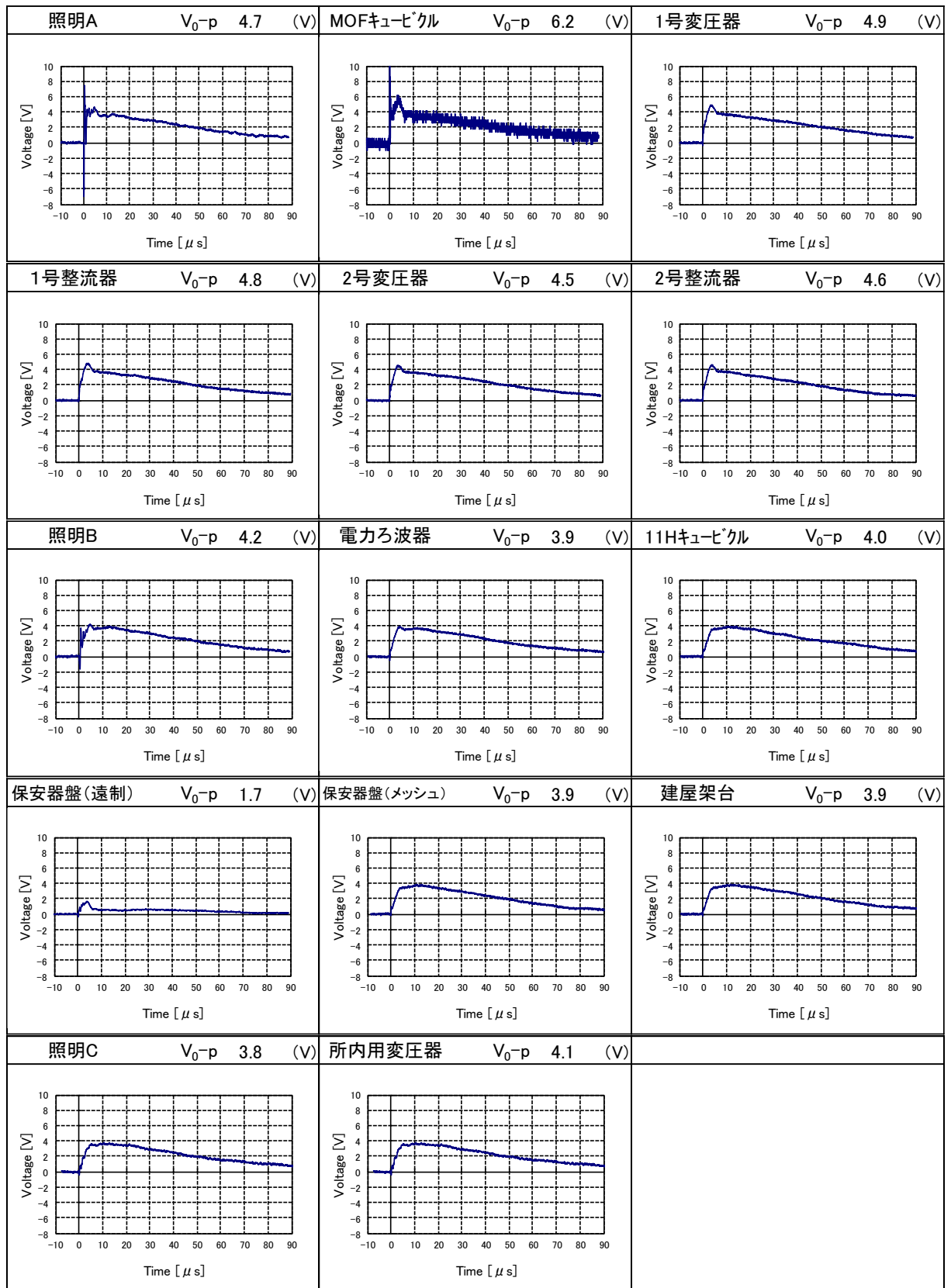


図 5.11 受電側避雷器注入時の測定点電位上昇

表 5.4 最大電位分布測定結果（き電側避雷器 11H 注入）

測定箇所		測定端子	印加電流[A]	測定電圧[V]	
照明A	接地系	E-V ₀	3.0	6.6	
MOFキュービクル	接地系	E-V ₀		4.9	
1号変圧器	接地系	E-V ₀		4.6	
1号整流器	接地系	E-V ₀		4.6	
2号変圧器	接地系	E-V ₀		4.6	
2号整流器	接地系	E-V ₀		4.7	
照明B	接地系	E-V ₀		6.5	
電力ろ波器	接地系	E-V ₀		4.5	
11Hキュービクル	接地系	E-V ₀		5.0	
保安器盤	メッシュ接地(En)	接地系		E-V ₀	4.8
	遠制接地(Ef)	接地系		E-V ₀	3.8
建屋架台	接地系	E-V ₀		4.8	
照明C	接地系	E-V ₀		5.5	
所内用変圧器	接地系	E-V ₀		4.8	

表 5.5 最大電位分布測定結果（受電側避雷器注入）

測定箇所		測定端子	印加電流[A]	測定電圧[V]	
照明A	接地系	E-V ₀	3.1	4.7	
MOFキュービクル	接地系	E-V ₀		6.2	
1号変圧器	接地系	E-V ₀		4.9	
1号整流器	接地系	E-V ₀		4.8	
2号変圧器	接地系	E-V ₀		4.5	
2号整流器	接地系	E-V ₀		4.6	
照明B	接地系	E-V ₀		4.2	
電力ろ波器	接地系	E-V ₀		3.9	
11Hキュービクル	接地系	E-V ₀		4.0	
保安器盤	メッシュ接地(En)	接地系		E-V ₀	3.9
	遠制接地(Ef)	接地系		E-V ₀	1.7
建屋架台	接地系	E-V ₀		3.9	
照明C	接地系	E-V ₀		3.8	
所内用変圧器	接地系	E-V ₀		4.1	

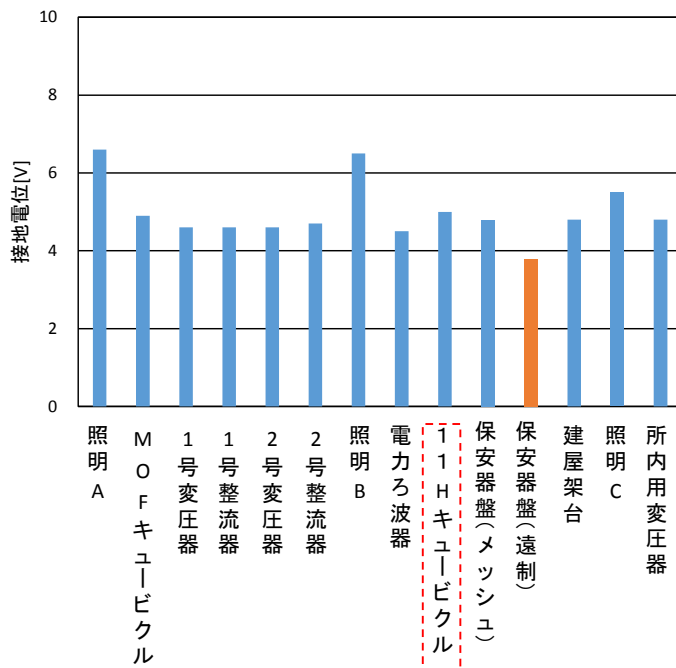
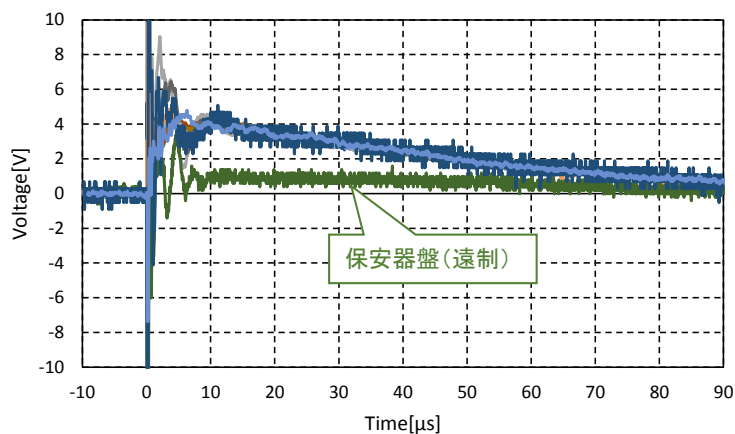
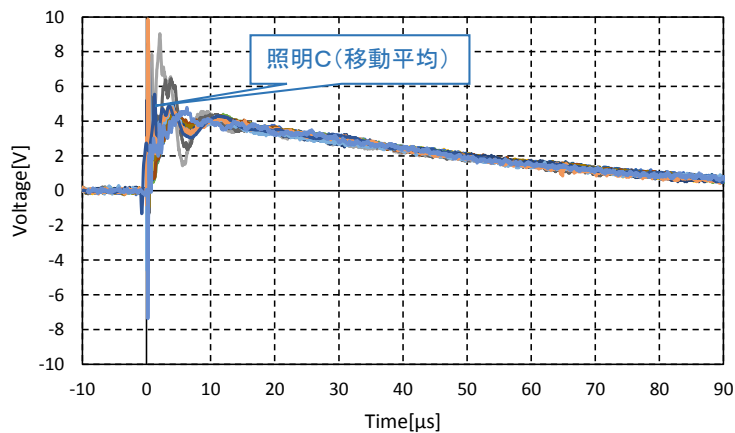


図 5.12 接地系の電位分布（き電側避雷器接地端子（11H,13H）注入）



(a)全波形比較グラフ



(b)メッシュ波形接地比較グラフ

図 5.13 電位波形比較（き電側避雷器注入）

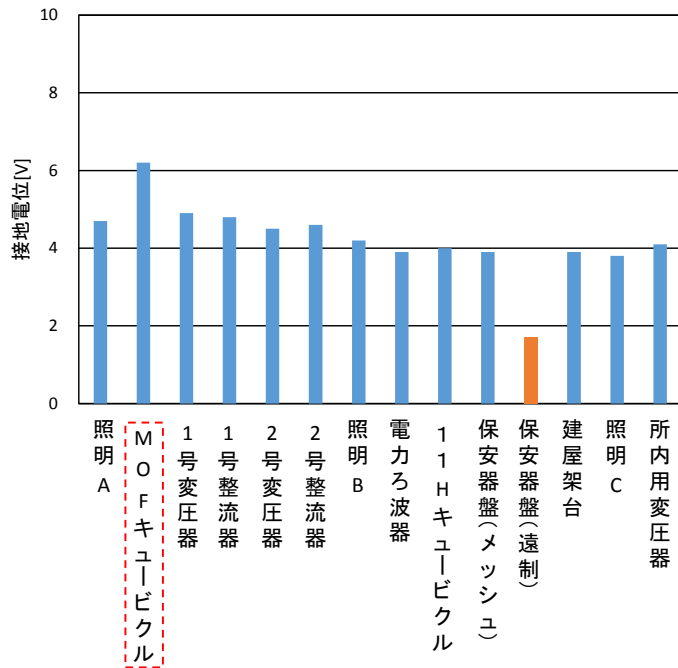
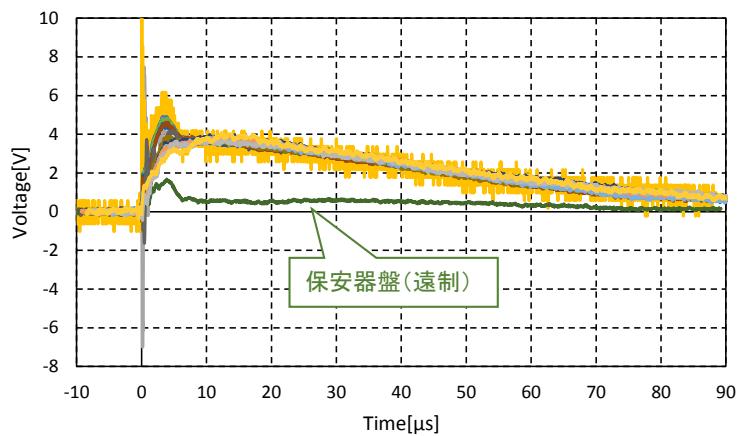
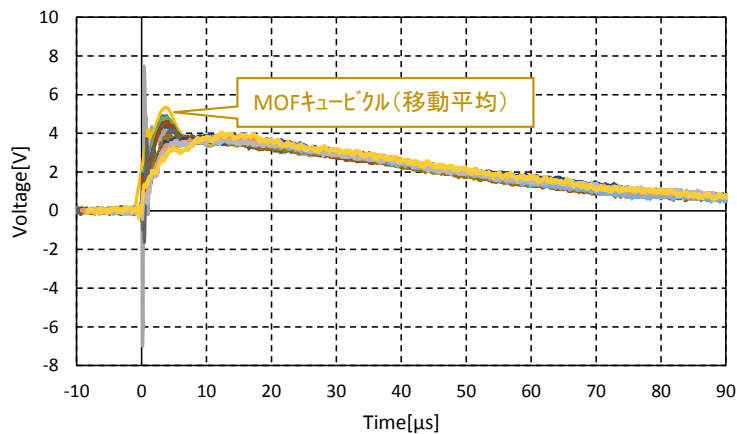


図 5.14 接地系の電位分布 (受電側避雷器注入)



(a) 全波形比較グラフ



(b) メッシュ波形接地比較グラフ

図 5.15 電位波形比較 (受電側避雷器注入)

以上の結果を基に、変電所構内メッシュと変電所構内に敷設されている遠制接地の雷サージ伝搬特性について検討する。ここで、き電側、受電側避雷器注入時の保安器盤メッシュ接地（測定点10）と遠制接地の電位上昇波形を図 5.16 に再掲する。き電側注入時におけるメッシュ接地と遠制接地の比較を図 5.16 (a)、受電側注入時におけるメッシュ接地と遠制接地の比較を図 5.16 (b)、き電側注入と受電側注入時のメッシュ接地電位比較を図 5.16 (c)、遠制接地電位の比較を図 5.16 (d) とする。

図 5.16 (a), (b)より、遠制接地はメッシュ接地と比較すると、波頭部、波尾部共に振幅が小さく波形様相も異なり、個別接地であることが明確である。また、き電側注入時の遠制接地線は、図 5.5 に示すように、この敷設ルート上に 5 m 程度電流注入線が並行したため、受電側電流注入では見られないメッシュ接地と同程度のスパイク状電圧が観測された。

図 5.16 (c), (d)より、メッシュ接地及び遠制接地電位にき電側注入時の方が若干高くなった。また、メッシュ接地については、き電側注入の場合はスパイク状の波形も観測される特徴がある。一方、遠制接地については、電流注入線からの誘導による振動を除けば差異はわずかである。

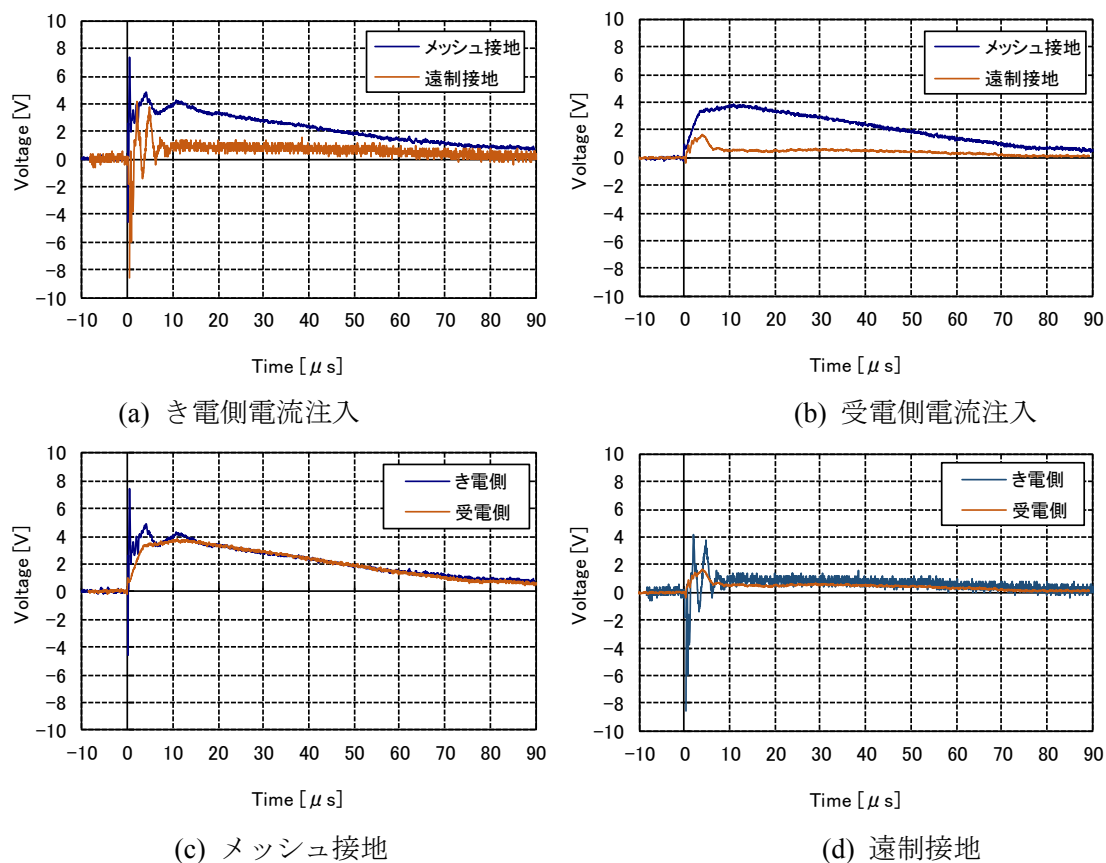


図 5.16 遠制接地電位上昇特性

5.4 まとめ

本章では、電鉄用 I 変電所接地網を対象に雷サージ特性を実測した。電鉄用変電所の避雷器はき電側および受電側に設置されている。き電側または受電側に雷撃があった場合、避雷器が動作した直後に避雷器から接地網に接続される接地線を介して急峻な雷電流が流入する。この状況を評価す

るために、き電側あるいは受電側の避雷器接地端子にパルス電流を注入した時の避雷器接地線に発生する電圧波形をデジタルオシロスコープにて電位分布測定を実施すると共にサージCTにて測定した電流と接地端子電圧からサージインピーダンス測定し、以下のことが明らかとなった。

サージインピーダンスは、き電側で $59.2 \pm 0.6 \Omega$ 、受電側で $89.9 \pm 5.4 \Omega$ となった。き電側避雷器の接地線は、接地網から 11H、13H それぞれの避雷器までの距離が同程度であるため、ほぼ等しい値となったが、受電側避雷器の接地線はキュービクル内における立上接地線の長さが異なることによる差異が生じた。接地線の長さが最も短い相のサージインピーダンスが最も小となっている。このように、接地線の長さがサージインピーダンスの大きさに与える影響は大きく、接地線を施工する場合は、極力変電所接地網との最短ルートを選定し接続することが望ましい。

一方、電位分布測定では当該施設接地系の電位分布として、メッシュ接地が施されている設備は等電位化が形成される。一方、サージ侵入箇所によらずメッシュ接地と遠制接地は過渡及び定常共に波形様相が異なり、保安器盤（遠制）については個別接地として取り扱い得る。遠制接地は主として通信回線の接地を目的としており、誘導電圧が 20%程度観測されるものの電位上昇は抑制されているため、有効な設備構成である。

6章 電鉄用変電所の制御線に誘導される雷サージ電圧

6.1 はじめに

2013年、ある鉄道事業者において、新幹線A変電所の断路器を制御する配電盤が雷撃により損傷を受ける事象が発生した。この原因を究明するため、障害発生事象を模擬したフィールド試験を行った⁽³⁵⁾。ここでは、インパルス発生器を用いて避雷器接地線または送電線の架空地線(GW)から変電所接地網に電流を注入した。制御ケーブルに誘導される電圧は、制御回路の耐電圧2.5kV⁽¹¹⁾と比較し高い電圧となった。よって、同種の障害を防止するため、更なる検証を実施した。

新幹線変電所は、区間によって異なる制御線が使用されている。一つは、シールド層を有しないCVV(Control-use Vinyl insulated Vinyl sheathed cable)ケーブル、もう一つはシールド層を有するCVV-Sケーブルである。1975年までに開業した新幹線区間は、CVVケーブルを使用し、CVV-Sケーブルは、電磁誘導や遮断器の開閉に伴う開閉サージを防止する目的で新幹線延伸区間において使用されている。CVVケーブルを使用している区間では、これまでも雷撃に伴う障害がたびたび発生しているため、CVV-Sケーブルへの取替が求められているが、すべての取替えには時間と費用を要する。

まず、この鉄道事業者の有する新幹線変電所の過去5年間の落雷数を調査した。その結果から、落雷による損傷の可能性が最も高いA変電所を対象に本章で検討する。実態に合わせた制御ケーブルへの誘導電圧を明らかとするため、実運用している変電所の設備を用いて検証した。また、多様な雷撃を模擬するために、異なる3つのインパルス発生器を使用した。

6.2 制御線誘導電圧の実測

6.2.1 制御線誘導電圧測定回路

図6.1は制御線への誘導電位を測定するための試験回路を示す。変電所では、変電所内の変電機を制御するために、配電盤から制御ケーブルが延線されている。インパルス電流は、避雷器接地線を経由し、接地網に注入する。このとき、交流き電側において、下り線側をPoint Aとし、上り線側をPoint Bとする。また上り線側の鉄構架台をPoint Cとする。ここで、架空地線GWはこの鉄構に接続されている。注入電流およびそれぞれの印加電圧の波形は、広帯域CT(ピアソン411)、電圧プローブ(横河電機700988)、デジタルオシロスコープ(日本テクトロニクスTPS2024)を用いて測定する。

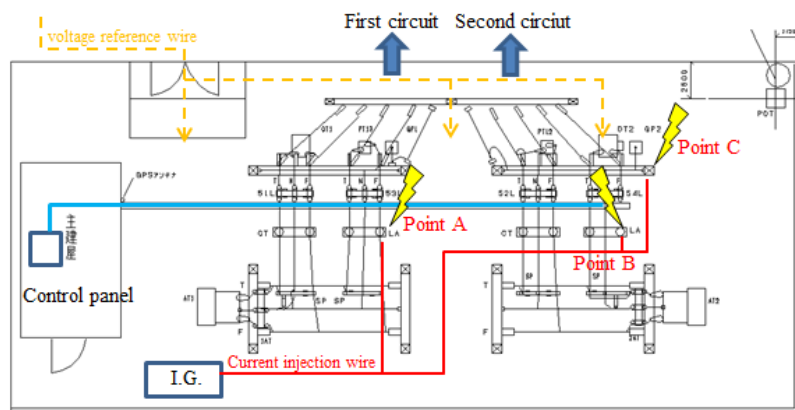


図 6.1 新幹線変電所における制御線誘導電圧測定

測定回路を図 6.2 に示す。同図 (a)に示すように、測定回路における不要な反射による影響を抑えるため、インパルス発生器と電流印加線の間に $450\ \Omega$ の抵抗を電流注入点直前およびインパルスジェネレータ I.G.の接地線に 2 箇所挿入し、インピーダンスマッチングをとった。接地網の電位および配電盤の制御ケーブルは図 6.2 (b), (c)に示す方法で、雷電流を模擬するインパルス電流が接地網に流入するときに制御ケーブルに誘導される電圧を測定した。電位は、測定対象物の電圧と変電所から 130 m 程度遠方に打設した接地電極から延線する電圧測定線との電位差として定義する。測定対象の新幹線変電所には、主に 4 つの制御回路がある。回線名は、51L, 52L, 53L および 54L であり、5 芯の CVV ケーブルを使用している。これらの制御ケーブルの中で最も長く延線されている 54L の制御ケーブルを測定対象とした。

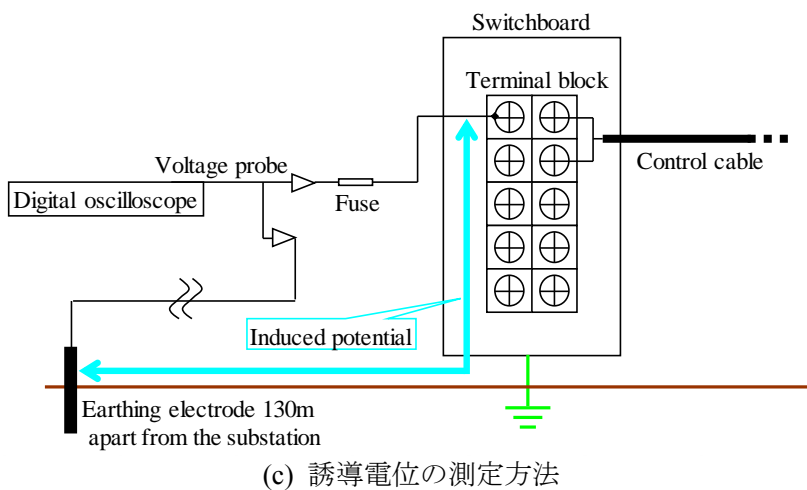
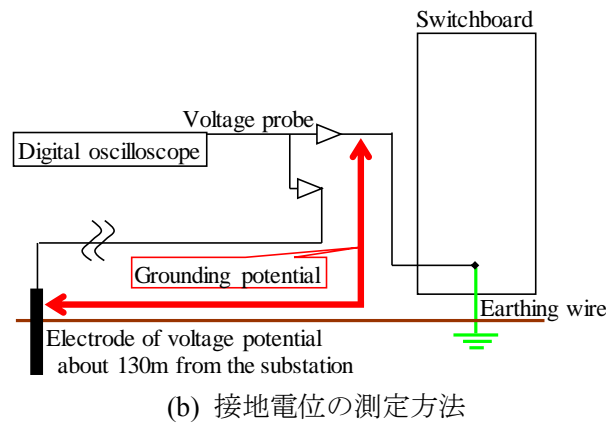
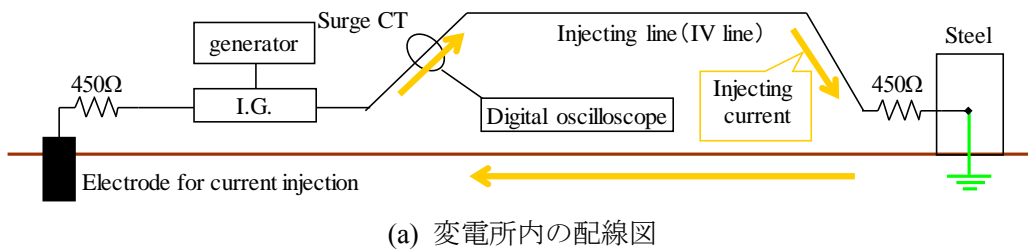


図 6.2 新幹線変電所における制御線誘導電圧測定回路

表 6.1 に誘導電位の測定試番を示す。Case 1 は、図 6.2 (b)に示す配電盤の接地線電位を示し、Case 2～Case 5 は制御ケーブルとして実運用している芯線の電圧を測定する。Case 2 は、現在の変電所の運用状態と同様に、CVV ケーブル (5 芯) の使用していない 3 線の芯線はすべて開放とし、使用している芯線に誘導される電圧を測定した。文献(35)において、仮設した制御ケーブルを用いた実測結果から、この空き線の両端接地は雷害対策に有効であると報告されている。Case 3 および Case 4 は、実運用状態の制御ケーブルの空き線の片端接地の場合を示す。Case 3 は空き線の配電盤側の芯線を接地し、Case 4 は配電盤からもっとも遠方に位置する屋外の 54L 断路器の空き線接地、Case 5 は空き線の両端接地を示す。

表 6.1 制御ケーブル誘導電位の測定試番

Case	項目
1	接地線
2	開放した接地線
3	配電盤側の片端接地
4	54L 機器側の片端接地
5	両端接地

6.2.2 制御線誘導電圧測定結果

図 6.3 に、試験で使用した注入電流波形を示す。インパルス発生器により注入する電流は、最大値 50 A、波頭長 3.6 μ s である。図 6.4 は、配電盤の制御ケーブルに誘導される誘導電位の最大値を示す。断路器 54L (Case 4)の制御ケーブルの配電盤から最も遠方すなわち機器側の片端接地の場合に制御ケーブルの誘導電位が最大となる。Cases 2, 3 および 5 における誘導電位の差はほとんどない。誘導電位は、図 6.2 (b), (c)に示すように端子電圧と電圧測定線間の電位差として定義している。雷害は、制御ケーブルに誘導される電圧と配電盤の接地電位の電位差として議論される。54L 断路器の制御ケーブルの芯線に誘導される電位と配電盤の接地端子(Case 1)間の最大電位差を図 6.5 および表 6.2 に示す。

図 6.4 および図 6.5 に示す試験結果から、誘導電圧の抑制効果は Cases 2, 3 および 5 では 13.8 % から 71.3 %であった。誘導電圧を抑制するための最も効果的な対策は Case 5、すなわち空き線の両端接地である。図 6.4 および図 6.5 は、50 A の振幅を有する電流を印加した場合の結果を示す。例えば、振幅 30 kA の雷電流を想定した場合、Case 2 における電圧は、2.28 kV (3.8 V/50 A)から 1.38 kV (2.3 V/50 A)に減少する。

一方、Case 4 (機器側の片端接地)において芯線と接地端子間に誘導される電圧は、鉄構架台(Point C)電流注入の場合は接地線からの誘導電位は表 6.2 より 36.3 %大となる。これより、配電盤の電位と電圧両方の観点から、機器側の片端接地はすべきではないことを示す。

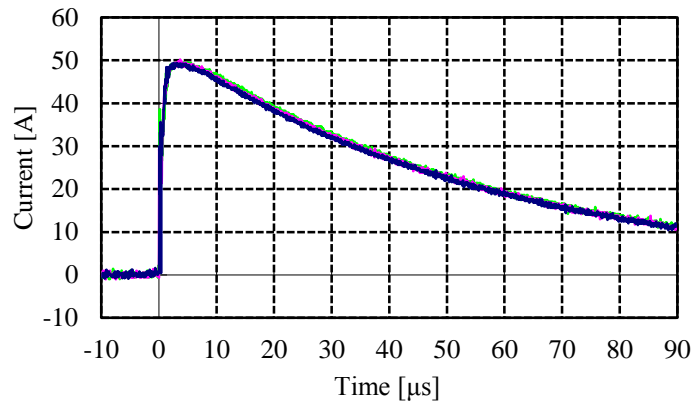


図 6.3 制御ケーブル誘導電圧測定に用いた注入電流波形(IG)

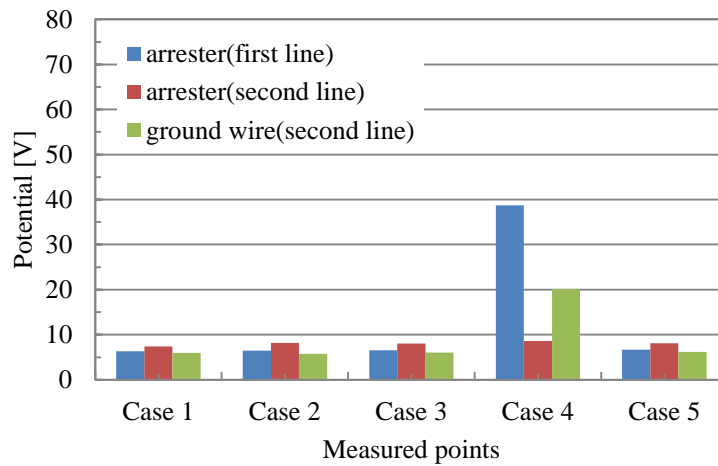


図 6.4 54L 制御ケーブルの誘導電位の実測結果

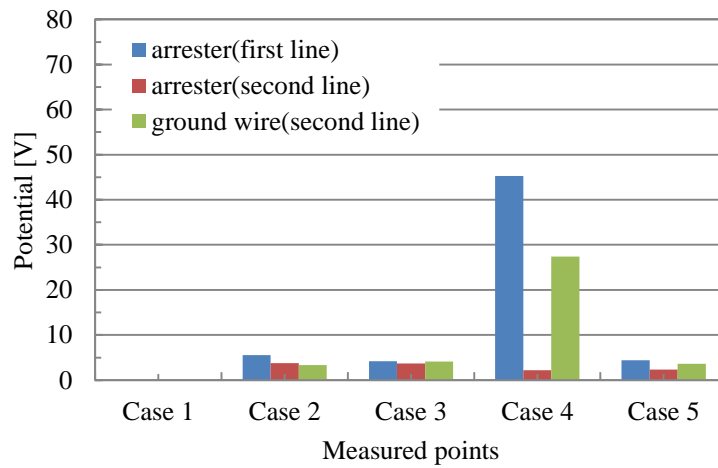


図 6.5 配電盤の 54L 制御ケーブルと接地端子間の電圧

表 6.2 誘導電圧の最大値

	Point A			Point B			Point C		
	Fig. 4 [V]	Fig. 5 [V]	diff. [%]	Fig. 4 [V]	Fig. 5 [V]	diff. [%]	Fig. 4 [V]	Fig. 5 [V]	diff. [%]
Case 2	6.44	5.55	-13.8	8.2	3.8	-53.9	5.7	3.4	-41.3
Case 3	6.51	4.21	-35.3	8.1	3.7	-54.7	6.0	4.1	-32.3
Case 4	38.7	45.3	17.1	8.6	2.2	-74.4	20.1	27.4	36.3
Case 5	6.69	4.41	-34.1	8.1	2.3	-71.3	6.2	3.6	-42.1

6.3 雷サージ電流波形が及ぼす制御線誘導電圧への影響

6.3.1 制御線誘導電圧試験用電流源

本節では、注入電流波形の立ち上がり時間が接地網の電位上昇や制御ケーブル与える影響について評価する。使用する異なる3つの電源装置の注入電流波形を図 6.3 および図 6.6 に示す。IG は、これらの中で最も大きな電流を注入できる。波頭長は短い順に PG, ICG, IG である。

表 6.3 電源の仕様

電源	最大電流	波頭長	波尾長
IG	49.7 A	3.6 μ s	44.3 μ s
PG	3.04 A	0.72 μ s	27.1 μ s
ICG	3.11 A	6.48 μ s	70.0 μ s

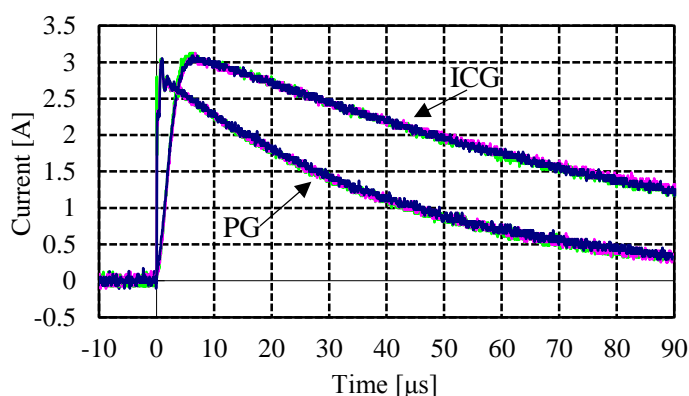


図 6.6 制御ケーブル誘導電圧測定に用いた注入電流波形 (PG, ICG)

6.3.2 接地網および制御線誘導電圧測定回路

図 6.7 に電流源の配置を示す。最大電圧と最大電流の比で定義されるサージインピーダンスを Point A, B, C それぞれ電流注入点で測定する。電流印加線は、絶縁電線を用いて地表面に配線した。測定点の電位測定には、前節と同様変電所接地網から 130 m 程度離れた距離に打設した接地極

から延線した絶縁電線電圧を基準線とした。電流注入も前節と同様、変電所近傍の土壤に打設した電極から吸い上げた。

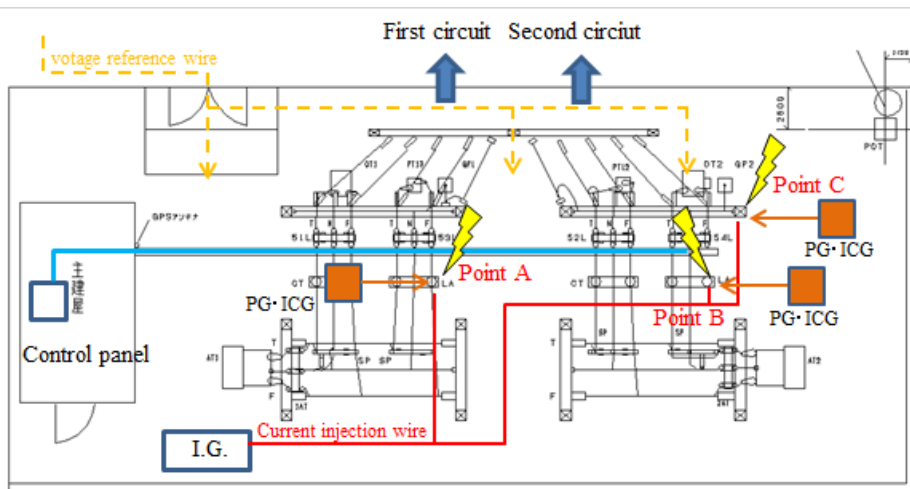


図 6.7 波頭長の異なる電源装置による接地網サージインピーダンス測定

6.3.3 雷サージ電流波形と接地網サージインピーダンスと制御線誘導電圧測定結果

図 6.8 は、フィールド試験から得られた接地網のサージインピーダンスの測定結果を示す。同図より、サージインピーダンスの最大値は 24Ω であり、最も波頭長が短い電流源 PG を使用した場合であった。しかしながら、このサージインピーダンスは、他の変電所の避雷器接地線から同様の電流を注入した場合のサージインピーダンス⁽²⁵⁾と比較すると 27%低い。これは、避雷器と変電所接地網を接続する接地線長さが他の変電所の同じ箇所で測定した場合よりも 25%程度短いことによる。さらに、上り線の避雷器接地線からの印加（図 6.7, Point A）と比較し、下り線の避雷器接地線からの印加（図 6.7, Point B）の方が 25%低くなっている。電鉄用変電所は、変電所構内すべてに接地網が埋設されず、変電機器の周囲のみに埋設されることが一般的である。このため、上り線のサージインピーダンスの上昇は、下り線の避雷器に比べ、上り線の避雷器が変電所接地網の端部に位置しているため、避雷器と接地網を接続する接地線が長くなったことに起因する。

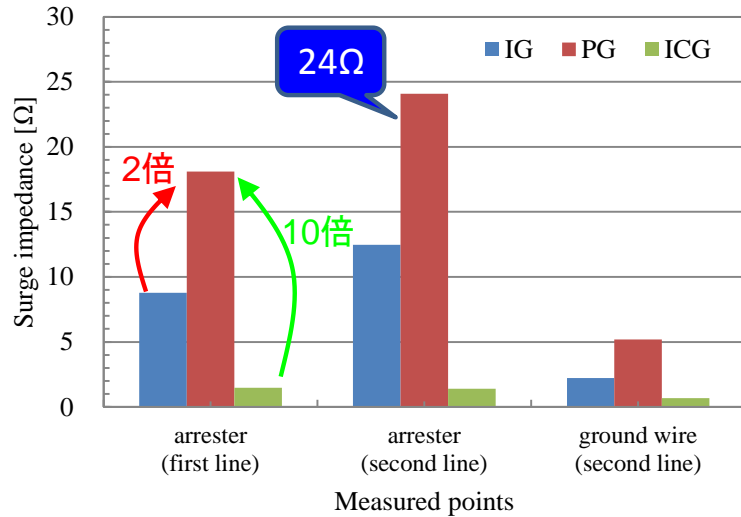


図 6.8 電源装置の異なる配置によるサージインピーダンス

図 6.8 は、波頭長が短いほどサージインピーダンスが高くなることを明確に示している。これは、電流振幅のみならず、短波頭長の電流が注入されると、大なる過電圧が発生することを示している。一方、雷電流の波頭長が長い場合であっても、接地網の電位は避雷器が動作することにより電位は上昇する。これは、印加された電圧が避雷器の放電電圧を超過した場合は、避雷器接地線を介して短波頭長の雷電流が接地網に流入するためである。また図 6.8 から、下り線の避雷器に雷電流を印加した場合、波頭長が IG よりも PG は 5 倍程度短いことにより、接地網のサージインピーダンスは、2 倍程度高くなる。一方、波頭長が IG よりも 1.8 倍程度長い ICG と比較すると接地網のサージインピーダンスは、IG の方が 10 倍程度高くなる。この結果は、印加する波形の波頭長に依存し、接地網のインピーダンスは誘導性であり、その特徴は高い周波数領域で顕著であることを示している。

図 6.9 に配電盤の端子で測定した制御ケーブル (CVV) の開放端の誘導電位を示す。PG または ICG を用いた最大注入電流は 3 A 程度である。接地網の電圧は、主に注入電流の波頭長に依存するが、制御線に誘導される電圧への影響は小さい。この結果から、例えば 30 kA の電流が避雷器から流入した場合、少なくとも 7 kV ($=0.7V \times 30 \text{ kA} / 3 \text{ A}$) の最大誘導電圧を予測することができる。これは、本章冒頭に記載した 2013 年の新幹線変電所で発生した制御ケーブルの損傷原因を示唆している。避雷器は、変電所の機器を保護するため交流母線に接続されているが、避雷器の放電などにより変電所接地網に急峻な電流が流入すると、制御線に高電圧が発生し、制御回路が故障する可能性がある。電流は制御ケーブルへの誘導電圧を発生させるため、耐電圧が低い電子回路は損傷を受けることになる。

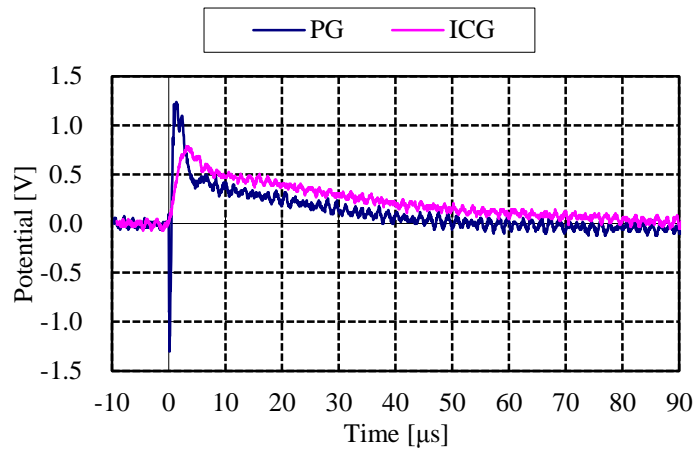


図 6.9 54L 接地線の電位

6.4 まとめ

本章では、制御ケーブルに誘導電圧を発生させる雷サージに焦点をあて、電鉄用変電所の過渡応答について検討した。制御ケーブルに発生する電圧は、電子回路を損傷させるには十分高いことを示した。避雷器から流入する急峻な電流は、誘導電圧を発生させる原因の一つである。避雷器は、雷サージから電力機器を保護するためには有効であるが、避雷器電流は電鉄用変電所の制御システムを設計する際には十分な事前検討が必要である。

制御ケーブルの空き線接地は、制御ケーブルに発生する誘導電圧低減には効果的である。空き線は配電盤側または両端接地が有効である。一方、機器側のみの片端接地は、制御ケーブルに高電圧が発生する可能性があるため実施すべきではない。

さらに、制御ケーブルへの誘導電圧に影響を与える雷サージ波形の影響について定量的に評価した。立ち上がり急峻な電流波形と接地網の電位上昇の関係性は強いが、今回測定した変電所では制御ケーブルの誘導電圧は小さいことを確認した。

7章 数値シミュレーションによる避雷器位置の検討

7.1 はじめに

近年、在来線電鉄用変電所において雷害による変電設備故障が増える傾向にある。これは、変電設備を構成する機器の電子化や落雷発生数の増加に起因すると考えられる。予備のシステムをもたない変電所では、雷害により安全・安定輸送に多大な影響を与える。このような雷害に対し、電力系統における送電線や変電所に生じる雷過電圧の解析には、汎用過渡現象解析プログラム EMTP (Electro-Magnetic Transients Program)を用いるのが一般的となっているが、電鉄用変電所の雷害を対象としたシミュレーション結果の報告はほとんどない。そこで、本論文では在来線電鉄用変電所の雷害事例に対し、その発生メカニズムを明らかにするとともに、雷害防止の具体的な対策について EMTP シミュレーションにより、その有効性を確認する。EMTP シミュレーションは、系統過渡回路解析の標準プログラムであり、大地内の電圧・電流の3次元分布を表現することはできないが、電力系統を容易に取り扱うことができる⁽⁶⁴⁾。

7.2 雷害事例

2014 年在来線 W 変電所において、受電・整流器系の短絡故障が発生した。設備点検の結果、定格容量 2270 kVA、変圧比 33/1.2 kV、1985 年製の整流器用変圧器 SR-Tr 高圧側巻線と対接地間の短絡故障と判明した。なお、障害発生から数日後に当該の SR-Tr の絶縁油を採取し分析した結果、アセチレンガスが検出された。これより、装置内部でアーク放電が発生した可能性が高い⁽⁴¹⁾。SR-Tr と隣接した位置に設置されているシリコン整流器 SR 等其他の変電設備に異常は見られなかった。図 7.1 に機器配置図を示す。当該変電所は、2 回線 (1L, 2L) 受電であり、避雷器は母線に接続されている。一般に、雷サージは侵入雷による直接的な過電圧が問題となる。そのため、避雷器が設置されるが、避雷器が設置されていても機器が損傷するなどの事象が発生している。そこで、本節では避雷器設置位置に着目し検討を進める。

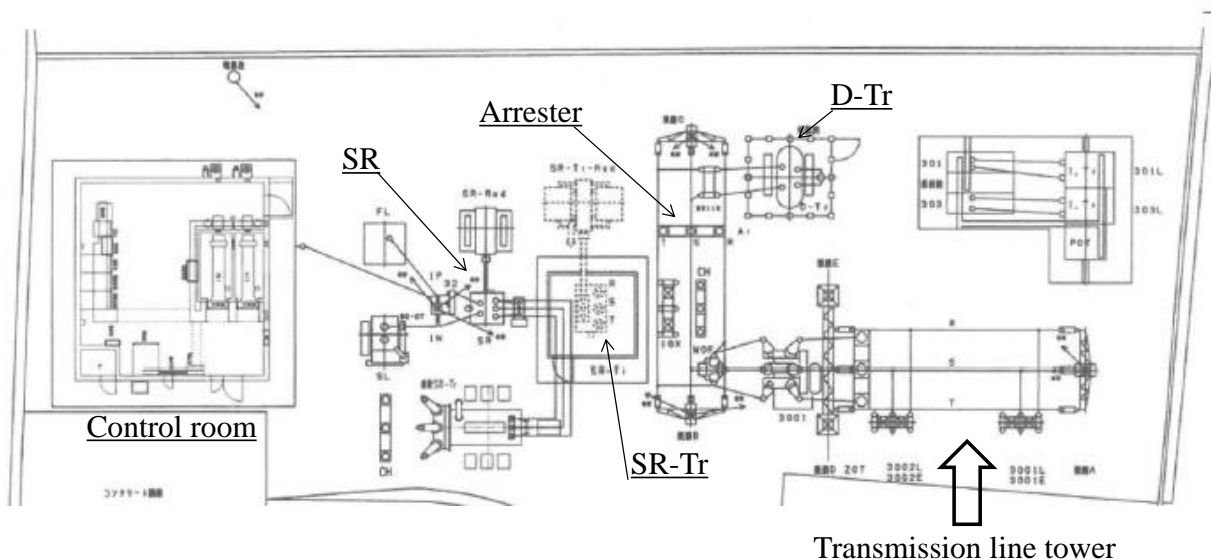


図 7.1 雷害を受けた変電所の構成

7.3 想定される雷電流

短絡故障が発生した時刻を含む約1時間の雷撃データを図7.2に示す。対象範囲は、変電所の所在地を中心とした10 km×10 kmである。雷電流は、変電所から6 km以内に計112回観測されており、30 kAを超える雷撃も数回観測され、最も大きい雷電流は、-47 kAであった。以上から、受電・整流器系短絡故障の原因は雷撃によるものと推定される。

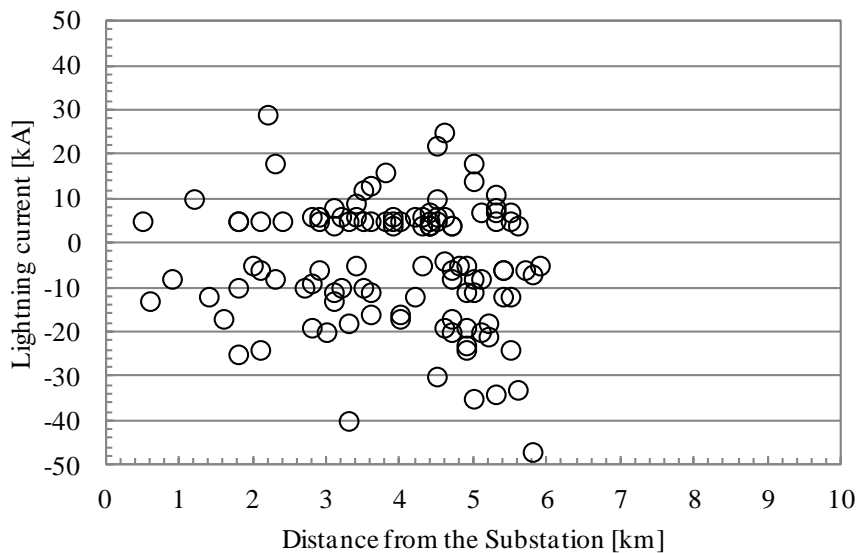


図 7.2 雷害を受けた変電所近傍の雷分布

7.4 解析モデル

当該変電所において、SR-Tr以外の設備は異常がなかったことから、受電端からの雷サージ侵入が想定されるため、送電系統に着目し、EMTPでシミュレーションした。解析モデルの全体概要図を図7.3に示す。解析対象は、変電所引込鉄塔(No.1)から2方向に分岐する合計35基(全長約7 km)である。

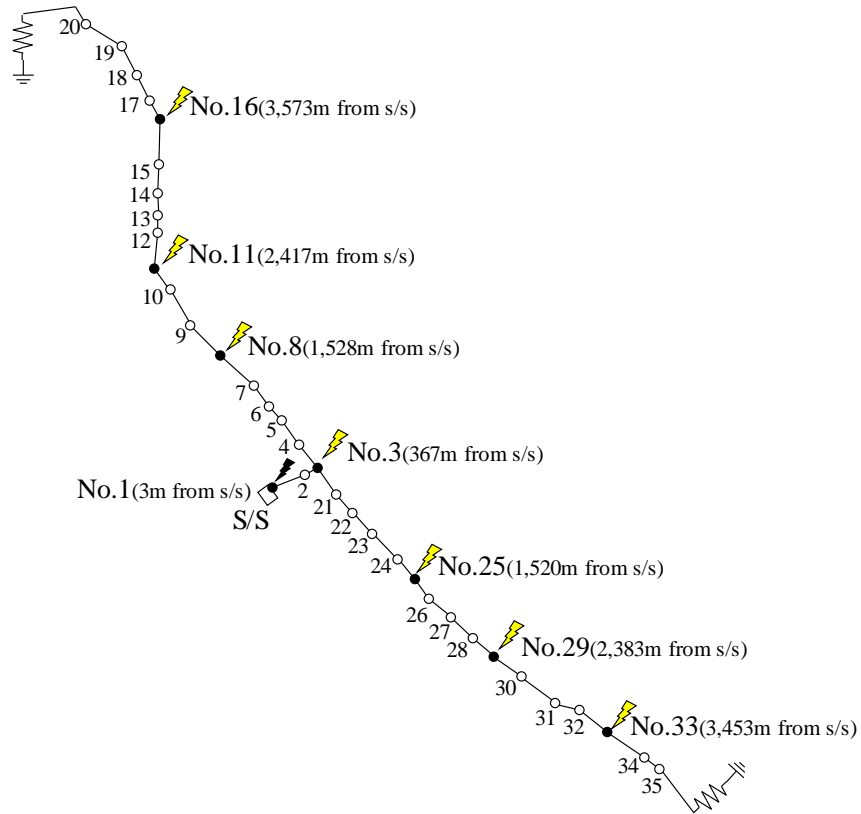


図 7.3 送電鉄塔の配置

7.4.1 鉄塔モデル

鉄塔モデルは各アームの電位上昇ならびに架空地線との相互結合を考慮できる 4 段モデル⁽⁶⁶⁾を採用した。鉄塔の寸法および塔脚接地抵抗については実設備データを採用してそれぞれモデル定数を、(7.1)~(7.4)式を用いて算出し、両アームが段違い配置となる分岐鉄塔 (No.3) の寸法に関してはアームの高さの平均値を適用した。鉄塔モデル定数を表 7.1 に示す。

$$r_1 = \frac{-2Z_{t1}l_n r_1}{l_1+l_2+l_3} \quad (7.1)$$

$$r_1 = \frac{-2Z_{t4}l_n r_2}{l_4} \quad (7.2)$$

$$R_1 = \gamma_1 l_1, R_2 = \gamma_1 l_2, R_3 = \gamma_1 l_3, R_4 = \gamma_1 l_4 \quad (7.3)$$

$$L_n = R_n \tau \quad (n = 1, 2, 3, 4) \quad (7.4)$$

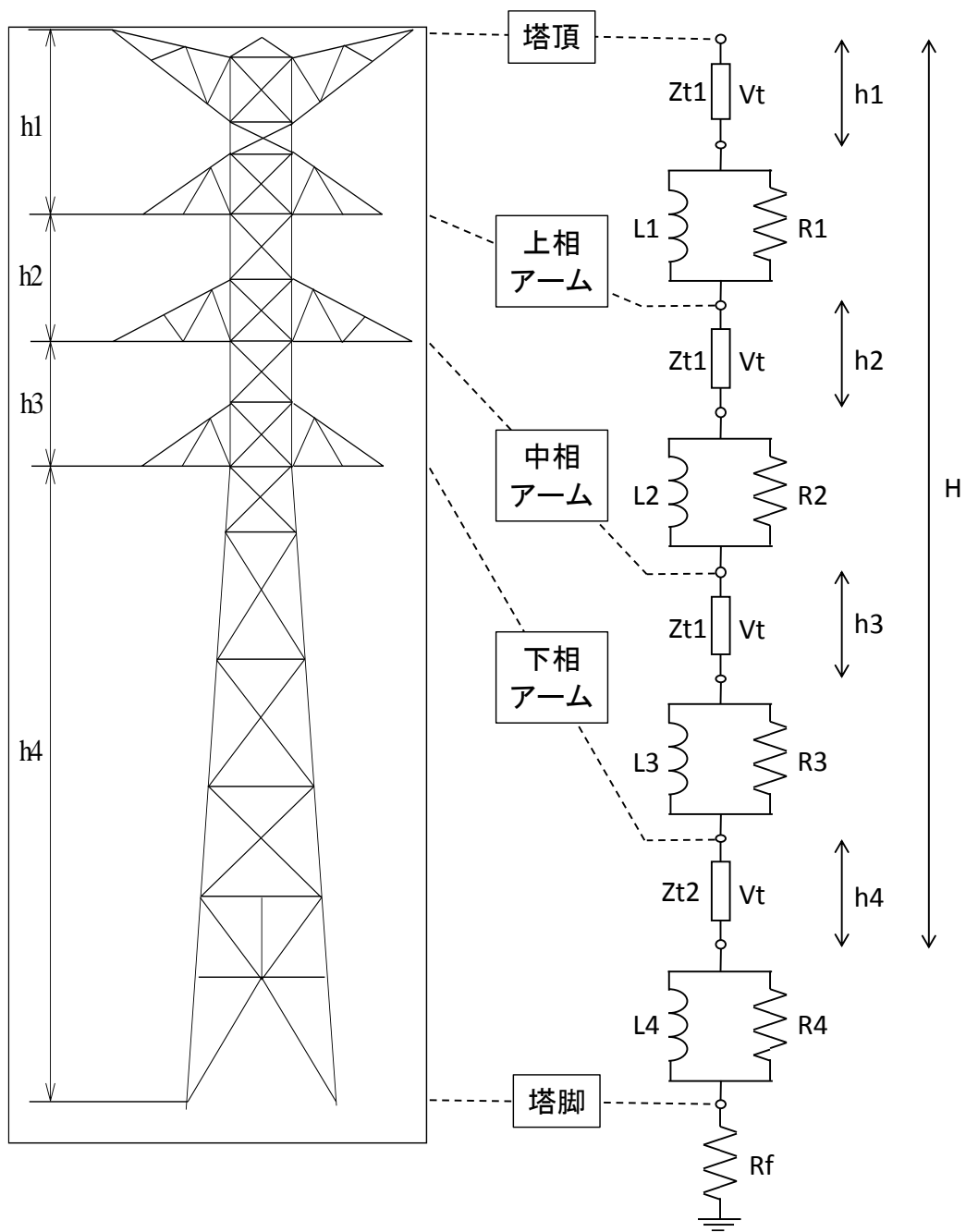


図 7.4 鉄塔モデル回路

表 7.1 鉄塔モデル定数

項目	鉄塔モデル											
	No.2	No.1	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12
Zt1[Ω]	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
Zt2[Ω]	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Vt[m/μs]	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
h1[m]	1.6	1.6	8.7	3.3	3.3	3.3	3.0	3.0	3.0	2.2	3.3	2.2
h2[m]	1.8	1.8	3.4	2.8	2.8	2.8	3.4	3.4	3.4	3.0	3.0	3.0
h3[m]	1.6	1.6	3.0	2.8	2.8	2.8	3.0	3.0	3.0	2.8	2.6	2.8
h4[m]	27.5	27.5	27.4	20.5	14.0	14.0	14.0	39.5	35.0	20.0	17.0	20.0
H[m]	32.5	32.5	42.5	29.4	22.9	22.9	23.4	48.9	44.4	28.0	25.9	28.0
R1[Ω]	31.419	31.419	56.569	36.405	36.405	36.405	31.335	31.335	31.335	27.000	36.405	27.000
R2[Ω]	35.346	35.346	22.107	30.889	30.889	30.889	35.513	35.513	35.513	36.819	33.095	36.819
R3[Ω]	31.419	31.419	19.507	30.889	30.889	30.889	31.335	31.335	31.335	34.364	28.683	34.364
R4[Ω]	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472
L1[μH]	6.807	6.807	16.028	7.135	5.558	5.558	4.888	10.215	9.275	5.040	6.286	5.040
L2[μH]	7.658	7.658	6.264	6.054	4.716	4.716	5.540	11.577	10.512	6.873	5.714	6.873
L3[μH]	6.807	6.807	5.527	6.054	4.716	4.716	4.888	10.215	9.275	6.415	4.953	6.415
L4[μH]	7.252	7.252	9.484	6.560	5.110	5.110	5.222	10.912	9.908	6.248	5.779	6.248
Rf[Ω]	8	5	12	7	4	5	5	11	8	5	5	5
項目	鉄塔モデル											
	No.13	No.14	No.15	No.16	No.17	No.18	No.19	No.20	No.21	No.22	No.23	No.24
Zt1[Ω]	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
Zt2[Ω]	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Vt[m/μs]	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
h1[m]	2.2	3.3	2.2	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	2.2	3.3	3.3	2.2
h2[m]	3.0	2.8	3.0	3.0	2.8	2.8	3.0	3.0	3.0	2.8	2.8	3.0
h3[m]	2.8	2.8	2.8	2.6	2.8	2.8	2.6	2.6	2.8	2.8	2.8	2.8
h4[m]	15.5	17.0	15.5	22.5	20.5	15.5	14.0	27.7	24.0	18.5	22.5	24.0
H[m]	23.5	25.9	23.5	31.4	29.4	24.4	22.9	36.6	32.0	27.4	31.4	32.0
R1[Ω]	27.000	36.405	27.000	36.405	36.405	36.405	36.405	36.405	27.000	36.405	36.405	27.000
R2[Ω]	36.819	30.889	36.819	33.095	30.889	30.889	33.095	33.095	36.819	30.889	30.889	36.819
R3[Ω]	34.364	30.889	34.364	28.683	30.889	30.889	28.683	28.683	34.364	30.889	30.889	34.364
R4[Ω]	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472
L1[μH]	4.230	6.286	4.230	7.621	7.135	5.922	5.558	8.883	5.760	6.650	7.621	5.760
L2[μH]	5.768	5.334	5.768	6.928	6.054	5.025	5.053	8.075	7.855	5.642	6.466	7.855
L3[μH]	5.384	5.334	5.384	6.004	6.054	5.025	4.379	6.999	7.331	5.642	6.466	7.331
L4[μH]	5.244	5.779	5.244	7.007	6.560	5.445	5.110	8.167	7.141	6.114	7.007	7.141
Rf[Ω]	5	5	5	5	6	10	5	2	7	9	8	7
項目	鉄塔モデル											
	No.25	No.26	No.27	No.28	No.29	No.30	No.31	No.32	No.33	No.34	No.35	
Zt1[Ω]	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	
Zt2[Ω]	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	
Vt[m/μs]	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	
h1[m]	3.3	3.3	2.2	2.2	3.3	3.0	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	
h2[m]	2.8	2.8	3.0	3.0	2.8	3.4	3.2	2.8	2.8	2.8	2.8	
h3[m]	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	3.0	3.2	2.8	2.8	2.8	2.8	
h4[m]	18.5	18.5	24.0	24.0	20.5	25.0	39.5	23.0	22.5	39.5	17.0	
H[m]	27.4	27.4	32.0	32.0	29.4	34.4	49.2	31.9	31.4	48.4	25.9	
R1[Ω]	36.405	36.405	27.000	27.000	36.405	31.335	33.403	36.405	36.405	36.405	36.405	
R2[Ω]	30.889	30.889	36.819	36.819	30.889	35.513	32.390	30.889	30.889	30.889	30.889	
R3[Ω]	30.889	30.889	34.364	34.364	30.889	31.335	32.390	30.889	30.889	30.889	30.889	
R4[Ω]	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	33.472	
L1[μH]	6.650	6.650	5.760	5.760	7.135	7.186	10.956	7.742	7.621	11.747	6.286	
L2[μH]	5.642	5.642	7.855	7.855	6.054	8.144	10.624	6.569	6.466	9.967	5.334	
L3[μH]	5.642	5.642	7.331	7.331	6.054	7.186	10.624	6.569	6.466	9.967	5.334	
L4[μH]	6.114	6.114	7.141	7.141	6.560	7.676	10.979	7.118	7.007	10.800	5.779	
Rf[Ω]	7	9	7	8	7	8	5	8	9	10	7	

L: 径間長 W: 鉄塔中心からの離隔距離 H: 地上からの高さ u: 上相, m: 中相, b: 下相
 線種... 架空地線: No.1~No.3⇒アルミ覆鋼より線 (AW 55sq×1)
 架空地線: その他⇒アルミ覆鋼より線 (AC 45sq×1)
 電力線: No.1~No.3⇒小サイズアルミ覆鋼心アルミ覆鋼より線 (SACSR/AW 80sq×1)
 電力線: その他⇒小サイズアルミ覆鋼心アルミ覆鋼より線 (SACSR/AW 100sq×1)
 IL: 上相...R相, 中相...S相, 下相...T相 ※No.22 シェンバード 2L: 上相...R相, 中相...S相, 下相...T相

7.4.2 送電線モデル

送電線は、線路インピーダンスの周波数依存特性を考慮し得る 7 相分布定数線路 (J.Marti model) で表現し、終端鉄塔以遠については各相特性インピーダンス自己成分実数部と等しいマッチング抵抗を接続した。送電線モデルの諸元を表 7.2 に示す。表中の L は径間長、W は鉄塔中心からの離隔距離、H は地上からの高さを示し、添え字 g, u, m, b はそれぞれ架空地線、上相、中相、下相を示す。なお、電線寸法および線種については実設備データを採用し、電線配置は両端の平均値を適用した。No.1~No.3 の架空地線はアルモウエルドより線 (AW 55 sq×1)、その他の架空地線はアルミ覆鋼より線 (AC 45 sq×1) とし、電力線は小サイズアルミ覆鋼心アルモウエルドより線 (SACSR/AW 80 sq×1)、その他の電力線は小サイズアルミ覆鋼心アルモウエルドより線 (SACSR/AW 100 sq×1) とした。両回線 (1L, 2L) 共に上, 中, 下相の順に R, S, T 相とした。それぞれの諸元および定数を基に、EMTP サブプログラムである JMARTI SETUP ならびに LINE CONSTANTS を用い線路モデル定数を計算した。大地抵抗率は 200 Ωm を仮定し、変換行列計算用の周波数は径間長より定まる過渡現象基本周波数 $f=1/4\tau=20$ kHz (τ : 径間伝搬時間) を用いた。

表 7.2 送電線モデルの諸元

項目	No.2	No.1	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12
	No.1	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13
L[m]	260	104	236	234	141	202	348	367	323	199	271	143
Wg[m]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Wu[m]	1.6	2.1	2.4	2.2	2.2	2.4	2.6	2.6	2.4	2.3	2.3	2.3
Wm[m]	2.2	3.0	3.8	3.8	3.8	4.2	4.5	4.5	4.2	3.9	3.9	3.9
Wb[m]	1.8	2.5	3.0	2.7	2.7	3.0	3.2	3.2	3.0	2.8	2.7	2.7
Hg[m]	32.5	37.5	36.0	26.2	22.9	23.2	36.2	46.7	36.2	27.0	27.0	25.8
Hu[m]	30.9	32.4	30.0	22.9	19.6	20.0	33.2	43.7	33.6	24.2	24.2	23.6
Hm[m]	29.1	29.8	26.9	20.1	16.8	16.9	29.8	40.3	30.4	21.2	21.2	20.6
Hb[m]	27.5	27.5	24.0	17.3	14.0	14.0	26.8	37.3	27.5	18.5	18.5	17.8
項目	No.13	No.14	No.15	No.16	No.17	No.18	No.19	No.20	No.21	No.22	No.23	No.24
	No.14	No.15	No.16	No.17	No.18	No.19	No.20	No.21	No.22	No.23	No.24	No.25
L[m]	162	230	350	170	221	249	329	243	203	210	287	210
Wg[m]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Wu[m]	2.2	2.2	2.3	2.2	2.2	2.2	2.3	2.4	2.2	2.2	2.2	2.2
Wm[m]	3.8	3.8	3.9	3.8	3.8	3.8	3.9	3.9	3.8	3.8	3.8	3.8
Wb[m]	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.8	3.0	2.7	2.7	2.7	2.7
Hg[m]	24.7	24.7	27.5	30.4	26.9	23.7	29.8	37.3	29.7	29.4	31.7	29.7
Hu[m]	22.0	22.0	24.7	27.1	23.6	20.4	26.5	31.8	27.0	26.1	29.0	27.0
Hm[m]	19.1	19.1	21.7	24.2	20.8	17.5	23.5	28.6	24.1	23.3	26.1	24.1
Hb[m]	16.3	16.3	19.0	21.5	18.0	14.8	20.9	25.7	21.3	20.5	23.3	21.3
項目	No.25	No.26	No.27	No.28	No.29	No.30	No.31	No.32	No.33	No.34		
	No.26	No.27	No.28	No.29	No.30	No.31	No.32	No.33	No.34	No.35		
L[m]	189	217	230	227	269	329	190	282	367	119		
Wg[m]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
Wu[m]	2.2	2.2	2.2	2.2	2.4	2.6	2.4	2.2	2.2	2.2		
Wm[m]	3.8	3.8	3.9	3.8	4.2	4.5	4.2	3.8	3.8	3.8		
Wb[m]	2.7	2.7	2.8	2.7	3.0	3.2	3.0	2.7	2.7	2.7		
Hg[m]	27.4	29.7	32.0	30.7	31.9	41.8	40.6	31.7	39.9	37.2		
Hu[m]	24.1	27.0	29.8	28.0	28.8	38.7	37.3	28.4	36.6	33.9		
Hm[m]	21.3	24.1	26.8	25.1	25.7	35.4	34.3	25.6	33.8	31.1		
Hb[m]	18.5	21.3	24.0	22.3	22.8	32.3	31.3	22.8	31.0	28.3		

7.4.3 変電所モデル

図 7.1 に示す在来線直流電鉄用 W 変電所の機器配置図を基に、変電所引込口から変圧器 2 次側（低圧側）端子までを模擬した。図 7.5 に変電所モデル回路を示す。引込線、母線、断路器、遮断器、変流器については、各長さに相当する気中母線の標準モデルである単相分布定数線路（特性インピーダンス $Z_0=350 \Omega$ ，伝搬速度 $v_f=300 \text{ m}/\mu\text{s}$ ）⁽⁶⁶⁾を適用し各相を模擬した。避雷器については、実設備の電圧—電流特性から求めた折れ線近似の非線形抵抗モデル (EMTP TYPE-92) を適用した。図 7.6 に避雷器の電圧—電流特性曲線を示す。

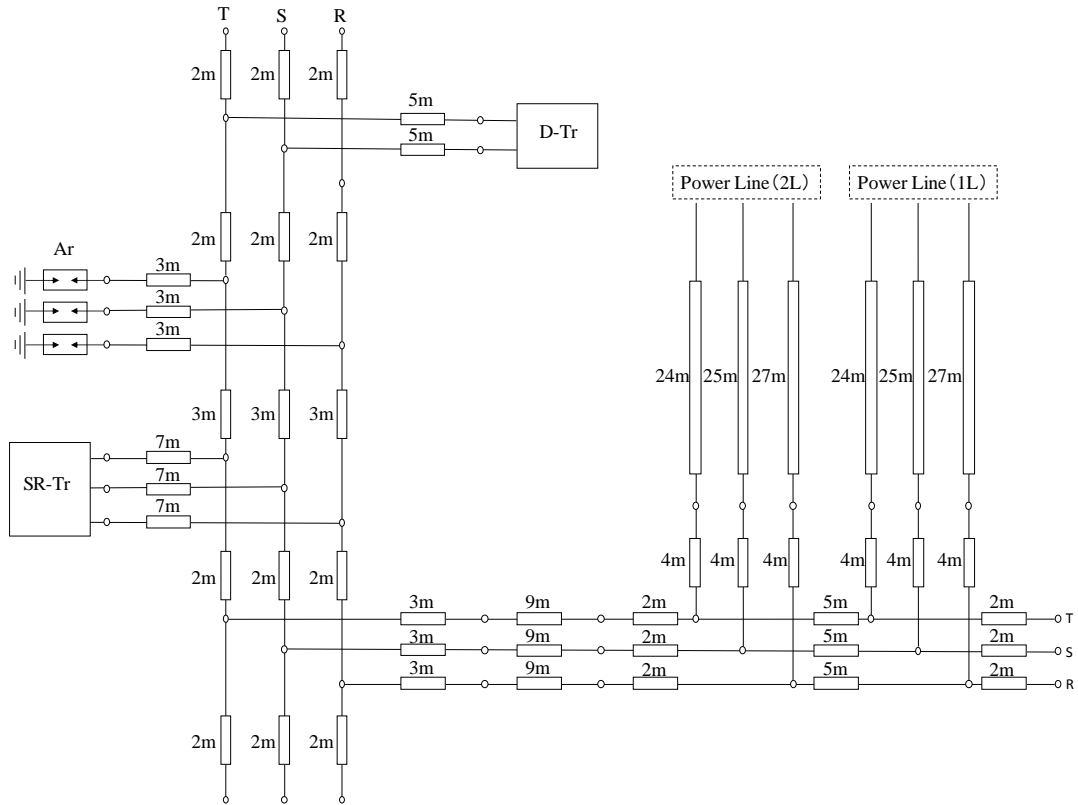


図 7.5 変電所モデル回路

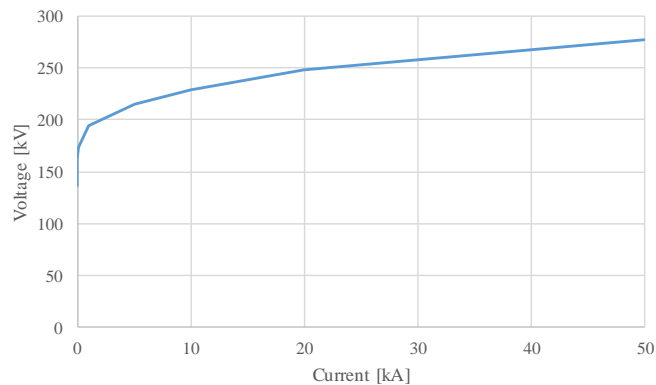


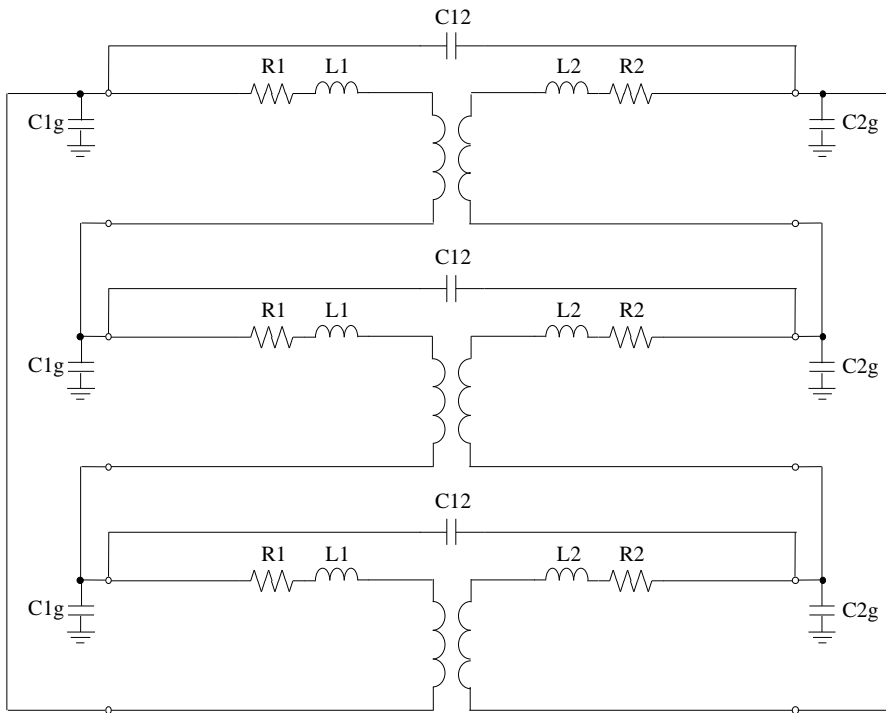
図 7.6 避雷器の電圧—電流特性

変圧器については、電磁移行分を模擬する商用周波数領域変圧器モデル (EMTP TRANSFORMER モデル) に静電移行分を模擬する巻線間および巻線対地間キャパシタンスを付加したモデルで表現した。変圧器モデルの諸元および定数を表 7.3 に、回路を図 7.7 に示す。なお、変圧器モデル定数については実設備データによる諸元を基に定めた。また、雷サージのような高周波数領域成分は、

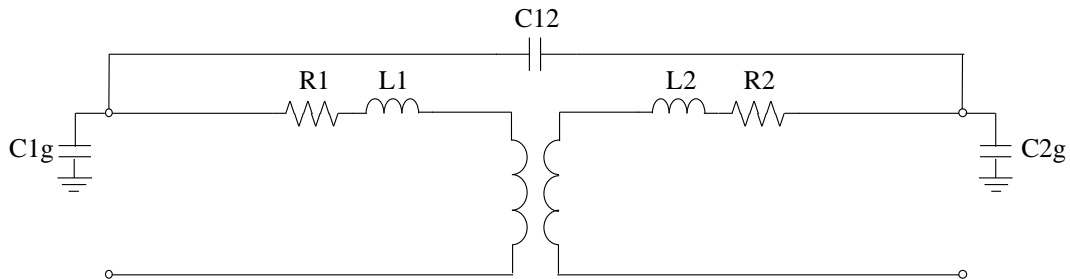
対地静電容量のバイパス効果が顕著であるので励磁サセプタンス b_0 、励磁損失抵抗 R_{mag} は無視した。

表 7.3 変電所モデルの諸元および定数

整流器用変圧器(SR-Tr)				配電用変圧器(D-Tr)			
諸元		モデル定数		諸元		モデル定数	
定格容量 P	2.27 MVA	一次漏れインダクタンス L1	141.8 mH	定格容量 P	0.3 MVA	一次漏れインダクタンス L1	243.9 mH
相数	3	一次巻線抵抗 R1	1.863 Ω	相数	1	一次巻線抵抗 R1	4.578 Ω
定格周波数 f	60 Hz	二次漏れインダクタンス L2	0.1875 mH	定格周波数 f	60 Hz	二次漏れインダクタンス L2	11.7 mH
一次-二次結線	△-△	二次巻線抵抗 R2	0.0025 Ω	一次-二次結線	-	二次巻線抵抗 R2	0.220 Ω
一次電圧 V1	33 kV	鉄損抵抗 Rmag	82.1 kΩ	一次電圧 V1	31.5 kV	鉄損抵抗 Rmag	927 kΩ
二次電圧 V2	1.2 kV	一次巻線対地間キャパシタンス C1g	1000 pF	二次電圧 V2	6.9 kV	一次巻線対地間キャパシタンス C1g	500 pF
定格インピーダンス電圧 %Z	7.43 %	二次巻線対地間キャパシタンス C2g	2500 pF	定格インピーダンス電圧 %Z	5.56 %	二次巻線対地間キャパシタンス C2g	1300 pF
無負荷損 Pi	4.42 kW	一次二次巻線間キャパシタンス C12	1500 pF	無負荷損 Pi	1.07 kW	一次二次巻線間キャパシタンス C12	800 pF
負荷損 Pc	21.44 kW			負荷損 Pc	3.03 kW		



(a) SR-Tr



(b) D-Tr

図 7.7 浮遊容量を考慮した変圧器モデル回路

7.4.4 その他モデル

フラッシュオーバ（鉄塔アームと電力線間の絶縁破壊）については、 $V-t$ 特性とリーダ進展によるインピーダンス変化を表現するスイッチとインダクタを組み合わせたリーダモデル⁽⁶⁶⁾で模擬した。フラッシュオーバモデル回路を図 7.8 に、その回路定数を表 7.4 に示す。また、雷撃モデルについては、雷道インピーダンス(400Ω)を付加した標準雷撃電流波形として 1/70μs のインパルス電流波形を適用した。

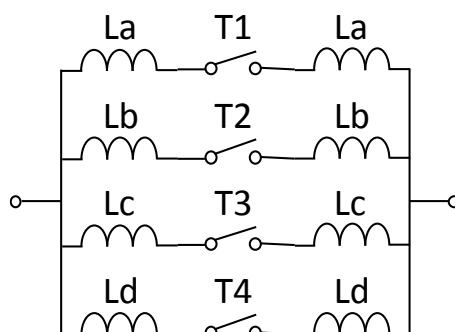


図 7.8 フラッシュオーバモデル回路

表 7.4 フラッシュオーバモデルのスイッチ投入時間とインダクタンス

T1 [μs]	T2 [μs]	T3 [μs]	T4 [μs]
0.581	0.902	1.049	1.104
La [μH]	Lb [μH]	Lc [μH]	Ld [μH]
3904.7	208.6	11.8	0.262

7.5 避雷器配置が変圧器電圧に及ぼす影響

前章で作成した解析モデルを基に雷撃点や雷撃電流値、フラッシュオーバ(F.O.)等の解析条件を変更し、変電所への侵入雷サージに伴う SR-Tr の事故解析を EMTP により行った。なお、計算項目は、雷撃電流、避雷器放電電流×三相、変電所引込口付近（遮断器）端子電圧×三相、SR-Tr 一次および二次側端子電圧×各三相、高圧配電線用変圧器（以下、D-Tr）一次および二次側端子電圧×各 2 相とし、検討対象は、故障状況が SR-Tr の 1 次側だけが絶縁不良であったため、1 次側のみとする。雷撃点は、変電所直近の第一鉄塔（No.1）塔頂とした（図 7.3）。雷撃電流値は図 7.2 に示す雷電流観測値を考慮して 30 kA とし、損傷した SR-Tr と健全であった D-Tr それぞれの 1 次側に発生する過電圧について検討した。なお、D-Tr は S、T 相に接続（単相）されているため、三相変圧器 SR-Tr と共通であるため、S 相について比較した。

雷撃による電位上昇測定点を図 7.9 に、各機器 S 相端子電圧計算結果を図 7.10 に示す。図 7.9、図 7.10 より、避雷器動作に伴い SR-Tr、D-Tr の侵入雷サージ過電圧は引込口付近における受電用遮断器(CB)の過電圧に比べて抑制されるが、避雷器の背後に配置された D-Tr に比べて損傷した SR-Tr の方が 20%程度高い電圧となった。これは、図 7.9 のように避雷器が D-Tr の直前に設置されていることによる。したがって、避雷器は被保護機器の直前に配置することが効果的と言える。

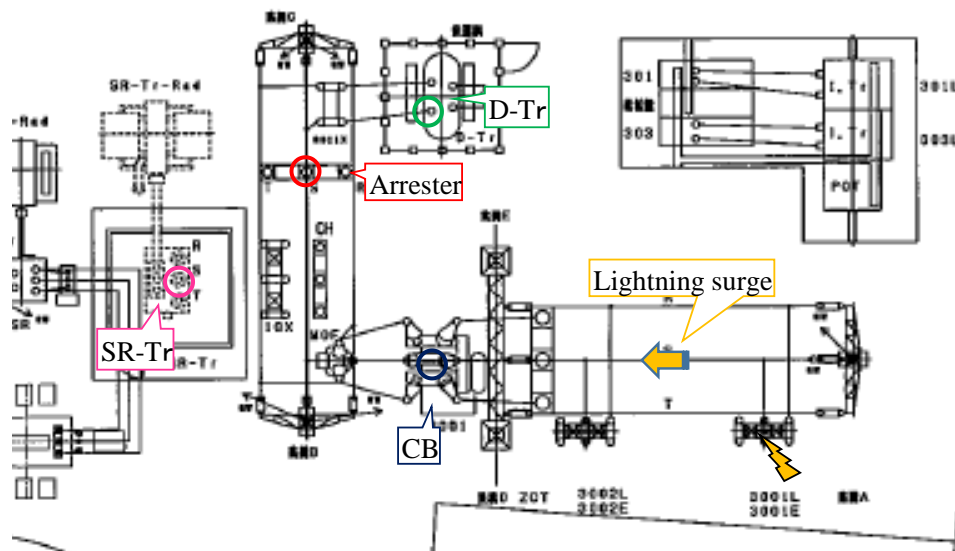
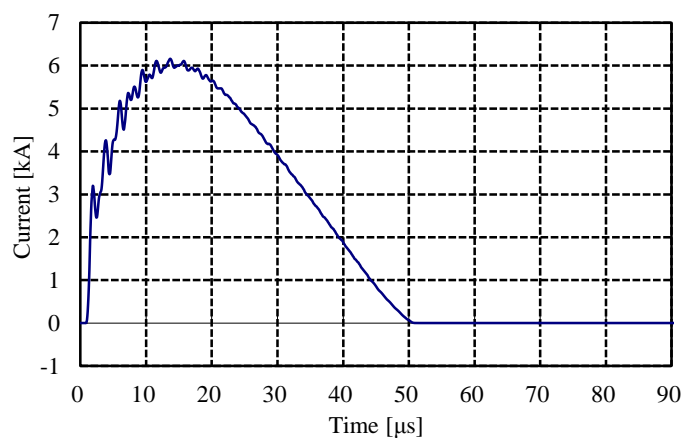
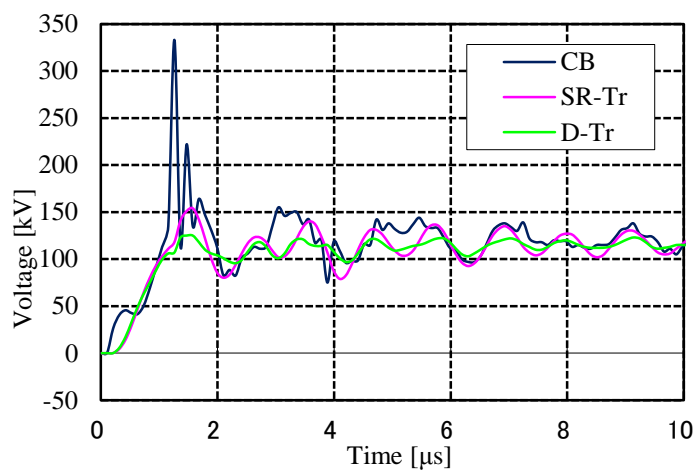


図 7.9 変電所配置詳細 (SR-Tr と D-Tr の侵入雷サージ)



(a) 避雷器の放電電流 (S相)



(b) 変電設備機器の1次側電圧 (S相)

図 7.10 現在の機器配置における計算結果.

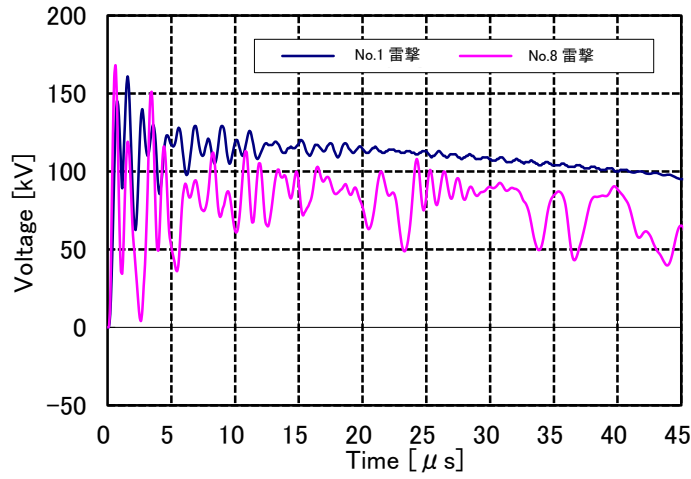
7.6 雷撃位置が変圧器電圧に及ぼす影響

本節では、落雷点を鉄塔 No.1, No.3, No.8, No.11, No.16, No.25, No.29, No.33 に変更した場合に SR-Tr 1 次側 R 相に発生する電圧を EMTP によりシミュレーションした。フラッシュオーバは、架空地線と最も近い位置にある R 相（上相）で発生するものとし、それぞれの鉄塔に 30 kA の雷撃があった場合を想定した。雷撃電流は、図 7.2 の雷分布をもとに 30 kA とした。

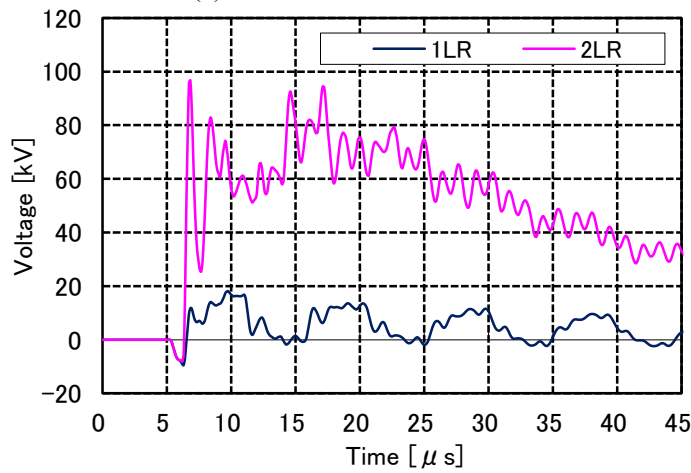
図 7.11 に SR-Tr1 次側 R 相侵入雷サージ（受電点）電圧波形を、図 7.12 に示す最大電圧解析結果から以下のことが確認される。

- (a) 雷撃点やフラッシュオーバの有無に関係なく振幅 30 kA の雷電流を仮定した場合、SR-Tr, D-Tr のインパルス耐電圧値（200 kV）を超過する電圧は発生しない。また、フラッシュオーバ無の場合は雷撃点に関わらず雷害対策を講ずるにフラッシュオーバの考慮は必須である。
- (b) ただしフラッシュオーバしなくても第一鉄塔（No.1）で落雷があった場合は、フラッシュオーバ時より若干低いが 30 kA の雷電流に対しては非常に高い過電圧が発生する。
- (c) 第一鉄塔（No.1）および変電所から 1.5 km 離れた No.8 鉄塔に落雷した場合には 150 kV 程度の過電圧が発生する。
- (d) 変電所から雷撃鉄塔間でジャンパーオフされている場合、通常の接続系統と比べて過電圧は非常に低くなるため、No.22 鉄塔以遠での落雷による原因の可能性は非常に低い。

ここで、ジャンパーオフとは送電線の保守等に伴い、一時的に送電を停止するため、ジャンパー線を取り外すことをいう。



(a) 1LR 相フラッシュオーバ



(b) No.8 雷撃

図 7.11 SR-Tr1 次側 R 相侵入雷サージ電圧 (鉄塔塔頂 30 kA 雷撃)

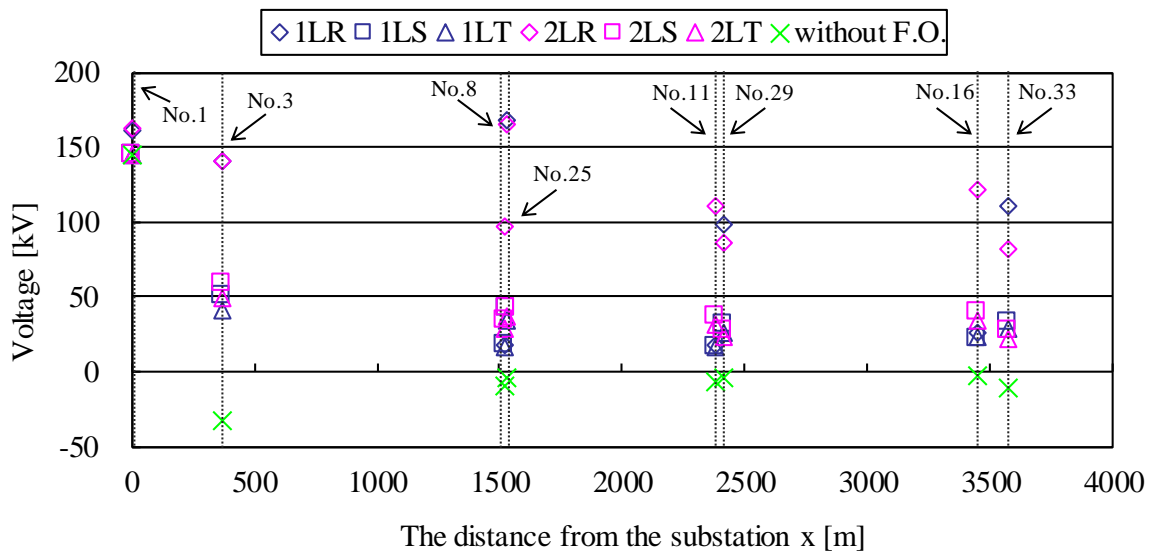


図 7.12 SR-Tr1 次側 R 相侵入雷サージ電圧 (鉄塔塔頂 30 kA 雷撃, 各鉄塔毎)

7.7 避雷器設置位置最適化による雷害対策

既設の避雷器は、特高母線に設置されている。本節では前章のシミュレーション結果より、SR-Trの侵入雷サージによる雷害対策について検討する。提案する雷害対策避雷器配置を図 7.13 に、避雷器配置による侵入雷サージを図 7.14 に示す。なお、鉄塔塔頂への雷撃電流振幅は図 7.2 に示す最大電流と概ね等しい 50 kA とし、雷撃点は図 7.12 に示す結果より第 1 鉄塔 (No.1) とした。また、避雷器配置については、現状、受電の引込口付近(A)および SR-Tr 直前(B)の 3 つの場合で比較した。

図 7.14 より、避雷器を受電の引込口付近(A)に配置変更することで、変圧器侵入雷サージ過電圧の低減が図れ、現状配置において変圧器耐電圧を超過するケースを回避できる。

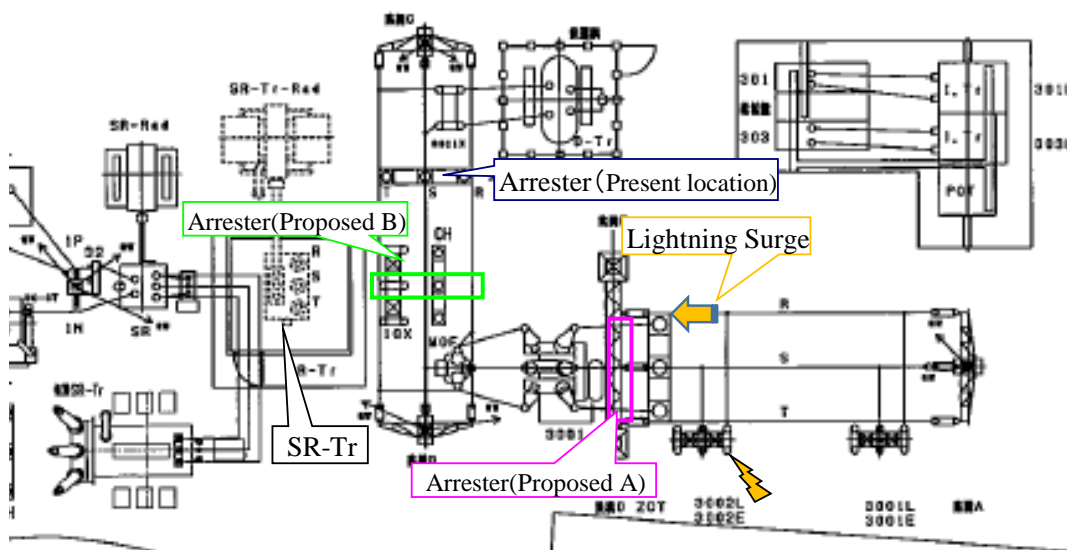
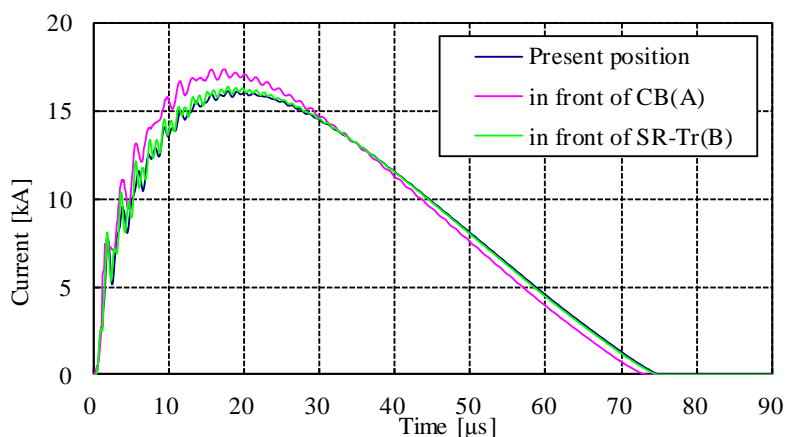
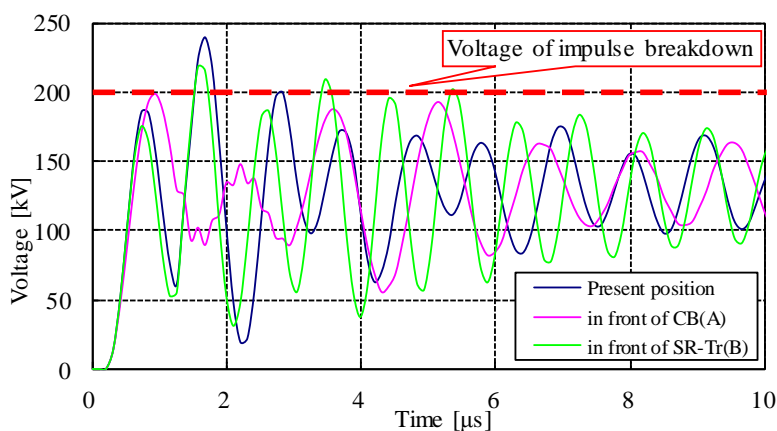


図 7.13 提案する避雷器設置位置



(a) 避雷器の放電電流 (R 相)



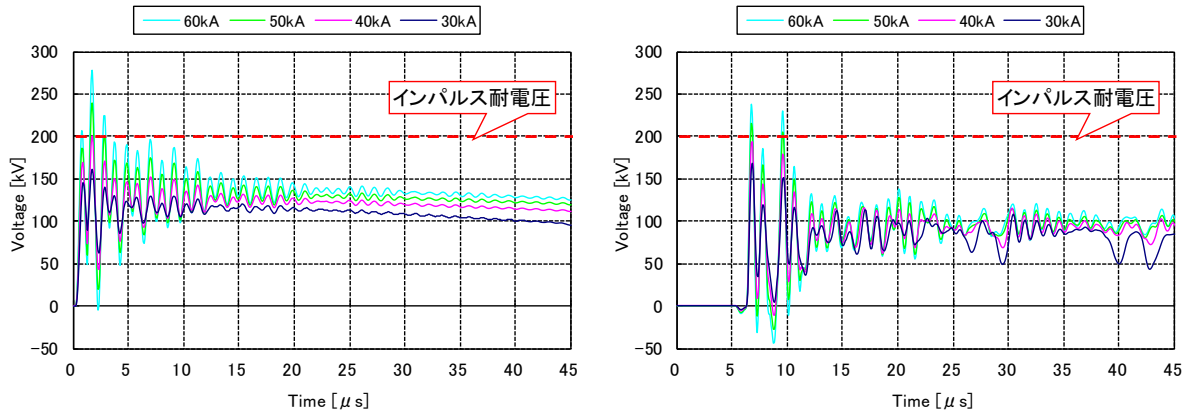
(b) R 相 1 次側に発生する電圧

図 7.14 避雷器設置位置最適化による雷サージ低減効果
(雷電流印加 (No.1 鉄塔塔頂), 1L-R 相 フラッシュオーバ)

7.8 雷電流の大きさによる比較

雷撃点は、図 7.3 において過電圧レベルが高かった変電所直近の第一鉄塔 (No.2), 分岐鉄塔 (No.3) および変電所からの離隔距離が約 1.5 km となる鉄塔 (No.8) を対象とし、鉄塔塔頂雷撃とした。雷撃電流値については 40, 50, 60 kA とした。解析条件は、1L の R 相と前節においても過電圧レベルが高かった第一鉄塔塔頂への雷撃にフラッシュオーバが発生した場合とした。

EMTP によるシミュレーション結果を、図 7.15, 表 7.5 に示す。



(a) No.1 雷撃 (1LR 相フラッシュオーバ) (b) No.8 雷撃 (1LR 相フラッシュオーバ)
 図 7.15 SR-Tr1 次側 R 相侵入雷サージ電圧 (雷撃電流値)

表 7.5 EMTP シミュレーション結果

Case	雷撃鉄塔塔頂	S/S 離隔距離[m]	F.O.	雷撃電流 [kA]	避雷器放電電流[kA]			引込口付近(遮断器)電圧[kV]			整流器用変圧器(SR-Tr)電圧[kV]						配電用変圧器(D-Tr)電圧[kV]			
					R相	S相	T相	R相	S相	T相	一次側			二次側			一次側		二次側	
											R相	S相	T相	R相	S相	T相	S相	T相	S相	T相
57	No.2 (第一鉄塔)	3	1LR相	39.6	10.850	1.004	0.698	487.5	127.4	113.1	200.3	124.2	112.2	61.5	50.1	51.0	109.0	111.5	41.4	42.6
58				49.6	16.108	1.354	0.953	589.3	140.3	127.6	239.9	138.4	122.8	76.1	54.9	53.3	114.1	109.0	43.5	41.6
59				59.5	21.492	1.680	1.221	691.9	148.1	137.0	278.8	151.3	134.3	89.7	60.0	56.8	121.6	111.2	46.3	42.4
60			なし	39.5	2.029	0.930	0.595	149.6	125.5	111.5	168.8	124.1	111.8	58.5	50.0	50.6	107.4	108.3	40.8	41.3
61				49.3	2.590	1.276	0.892	162.3	138.0	125.7	186.0	138.3	122.7	66.4	54.9	53.2	114.1	109.2	43.5	41.7
62				59.2	3.147	1.645	1.143	172.0	145.3	134.7	207.1	151.2	134.2	73.8	60.0	56.8	121.6	113.5	46.3	43.3
63	No.221 (分岐鉄塔)	367	1LR相	40.1	1.143	0.000	0.000	174.2	48.6	-46.2	172.7	54.1	44.1	55.8	26.1	27.6	58.2	49.1	21.3	19.5
64				50.1	1.725	0.000	0.000	217.8	-57.6	-59.3	205.4	59.9	48.0	66.1	29.0	29.1	65.0	54.1	23.9	21.5
65				60.1	2.299	0.000	0.000	261.4	-70.8	-72.5	234.9	64.5	-54.9	75.1	31.2	30.2	70.4	57.9	25.9	23.0
66	No.226	367	1LR相	40.0	2.319	0.000	0.000	228.7	46.4	-41.9	193.0	49.2	41.9	90.5	29.4	31.6	53.2	46.1	19.8	18.0
67				50.0	3.103	0.000	0.000	277.9	53.1	-52.4	215.4	56.5	46.8	104.9	30.4	33.1	60.6	51.8	22.6	20.2
68				60.0	3.867	0.000	0.000	326.0	59.1	-62.8	237.6	62.6	51.6	118.1	31.2	35.8	67.7	57.6	25.3	22.4

図 7.15 より、非線形素子であるアレスタが設置されていることより、発生するサージ電圧は雷撃電流値に必ずしも比例しない。また、SR-Tr への侵入雷サージ電圧に関して、No.1 鉄塔および No.8 鉄塔塔頂に 50 kA 以上の雷撃があると、R 相フラッシュオーバに伴いインパルス耐電圧 200 kV を超過する。

したがって、本章で検討している SR-Tr 損傷原因は、計算結果から No.1 鉄塔～No.8 鉄塔間の塔頂に 50～60 kA 相当の雷撃が生じて、R 相フラッシュオーバによる雷電流侵入が原因との結論となる。

しかしながら、落雷データでは事故の時に 50 kA 以上の落雷が変電所周辺で観測されていない。これは、本シミュレーションでは雷道インピーダンスが 400 Ω であることを仮定しており、実測時にはこれが大きく、雷道への分流が小となり、変電所侵入電流が大となった可能性がある。

雷道インピーダンスと同様、自然雷の雷波形も様々であり、波形の影響も考慮する必要がある。先のシミュレーションは、雷電流が標準的な 1/70 μs のインパルス波形と仮定した。これに対して、変圧器の固有周波数成分を有する雷サージ波形が侵入した場合は、共振によって更なる過電圧が発生する恐れがあり、変圧器巻線の焼損といった事故の一因として挙げられる。

7.9 電鉄用変電設備機器の周波数特性

変圧器の周波数特性を図 7.16 に示す。なお、同図(a)に示す周波数特性は、シミュレーションによって各変圧器 2 次側開放時にインパルス電流を注入し 1 次側の電圧と流入電流の時系列データを直線近似ラプラス変換 (LLT) ⁽⁵⁹⁾により算出し両者の比から得たインピーダンス、図(b)に示す周波数特性は、SR-Tr 1 次側 R 相端子電圧の数値ラプラス変換結果である。直線近似ラプラス変換 (LLT) の計算原理を以下に示す。

時間領域波形の周波数特性を得るには積分変換であるフーリエ変換が用いられるが、最大観測時間 T_{max} による打ち切り誤差が顕著となるため、本章では修正フーリエ変換を用いる。これはラプラス変換と同様の形式で与えられるが、ラプラス演算子を、積分路変更定数 α を用いて $s = \alpha + j\omega t$ とするものである。

$$\begin{aligned} F(s) &= \int_0^{\infty} f(t) \exp(-st) dt \approx \int_0^{T_{max}} f(t) \exp(-st) dt \\ &= \int_0^{T_{max}} f(t) \exp(-(\alpha + j\omega)t) dt \\ &= \int_0^{T_{max}} f(t) \exp(-\alpha t) \exp(-j\omega t) dt \end{aligned} \quad (7.5)$$

上式から明らかなように、修正フーリエ変換は時間関数 $f(t)$ に指数窓をかけたフーリエ変換である。打ち切り誤差を低減するため、積分路変更定数 α は最大観測時間において十分小となるよう選び、本論文では $\alpha = 2\pi/T_{max}$ とした。なお、積分を数値的に実行するには区分求積が必要となるが、これにより折り返し誤差が生ずる。そこで、離散化された時間関数を各離散点間で直線近似し、これを解析的に積分することによりこれを回避できる。

$$\begin{aligned} F(s) &\approx \int_0^{T_{max}} f(t) \exp(-st) dt \\ &= \sum_{i=1}^N \int_{(i-1)\Delta t}^i (a_i(t - i\Delta t) + f(i\Delta t)) \exp(-st) dt \end{aligned} \quad (7.6)$$

ここで、 $a_i = (f(i\Delta t) - f((i-1)\Delta t)) / \Delta t$ 、 $\Delta t = T_{max} / N$ 、 N : 区分数

上式の積分は解析的に計算できるため、関数の折れ線近似誤差を除けば、計算誤差は生じない。上式の計算には FFT のアルゴリズムを適用できるため、計算時間は従来の数値フーリエ変換とほぼ同様である。これらの演算を総称して直線近似数値ラプラス変換 (LLT) とし、本論文では本章のみならず各特性の周波数分析に用いている。

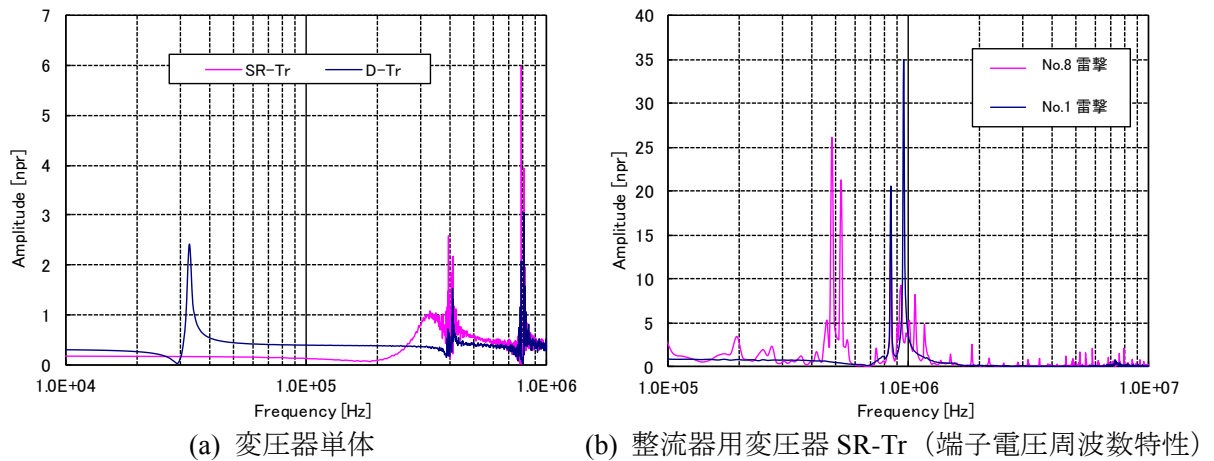


図 7.16 変圧器の周波数特性

図 7.16 より、在来線直流電鉄用 W 変電所に設置された変圧器単体における固有共振周波数は、SR-Tr, D-Tr 共に 400, 800 kHz で、D-Tr はこれらに加え 33 kHz においても共振する。雷撃点の変電所から数 m の位置にある No.1 雷撃では周波数約 1 MHz において変圧器端子電圧が大となり、変電所から 1.5 km 離隔した No.8 雷撃では概ね 500 kHz で共振し、変圧器単体における固有共振周波数と近接しているため、変圧器単体に過電圧が拡大する。前節の結果では 50~60 kA 相当の雷電流が侵入したことにより SR-Tr の損傷が生じたとの結果であったが雷電流に系統の共振周波数成分が含まれる場合、50 kA 以下の電流であっても変圧器の耐電圧を越える電圧が生じる可能性がある。

7.10 まとめ

本章では、電鉄用変電所の SR-Tr 損傷に着目し、EMTP によりシミュレーション解析した。解析結果から、R 相母線地絡事故の原因は、 $1/70 \mu\text{s}$ の雷インパルス波形、振幅 50~60 kA 相当の雷撃が変電所から数 m~1.5 km 離れた No. 1~No. 8 鉄塔間の塔頂で発生し、R 相フラッシュオーバーによる侵入の可能性が高い。ただし、500 kHz~1 MHz の周波数成分を有する侵入雷サージの場合は、変圧器の共振に伴い更なる過電圧が発生するため、本章で対象とした変電所が雷撃を受けた時刻を含む約 1 時間の雷電流は、統計上 96% 超が 30 kA 以下であったが、共振により 30kA の雷電流であっても雷撃により機器が損傷に至る可能性がある。

また、雷害対策として避雷器の配置を引込口付近に変更し、変圧器に発生する侵入雷サージ過電圧を抑制させることが好ましいことが明らかとなった。避雷器接地線については、5 章で示すように避雷器立上接地線を太く、短くすることが望ましく、立上接地線に帯状電極を放射状に付加することで更なる効果が期待できるものと考えられる⁽⁷⁶⁾。

8章 インピーダンスボンドの雷サージ解析

8.1 はじめに

近年電気鉄道信号システムにおいて、雷害による設備故障が増加傾向にある。これは、3章で述べたように、落雷数の増加が一因である。信号システムは、鉄道の安全・安定輸送に直結しており、これに障害が発生すると鉄道の運行に極めて大きな影響を及ぼす。この故障機器の一つに2.4節で述べた帰線電流と信号電流を区分し、列車の在線検知の役割を担うインピーダンスボンドがある。

本章では、鉄道信号システムの雷サージ特性において、軌道回路のインピーダンスボンドに焦点をあて、数値シミュレーションにより明らかにする。インピーダンスボンドに発生する障害には、閉そく区間内に存在する列車の在線検知の感度を共振により向上させる役割を担う共振キャパシタの焼損がある。キャパシタは受動素子であり、キャパシタ焼損には、かなりのエネルギーが必要である。したがって、焼損の原因として、レールから侵入する雷サージが最も疑わしい。しかしながら、これらの事象に焦点をあてた数値シミュレーションはほとんどなく、インピーダンスボンドの過渡特性を正確に模擬したシミュレーションモデルはない。

本章では、まず内部の共振キャパシタを考慮したインピーダンスボンドのモデリングについて述べる。インピーダンスボンドは単相3巻き線変圧器と同等の構造を有する。低周波領域においてインピーダンスボンドは、励磁インピーダンス、漏れインダクタンス、巻き線抵抗で表現できる。これらの要素はインピーダンスボンドの材質、形状などの定数から導出されるものではないが、変圧器のモデリングと同様の手法により、回路の開放、短絡試験からT型等価回路で表現できる。

一方、高周波領域の特性は理論的な解明がなされておらず、広く知られる一般的なモデリング法も存在しない。従って、高周波領域における変圧器の特性を表現する理論モデルは存在せず、実験結果からモデリングするブラックボックスモデルによらざるを得ない。ブラックボックスモデルはインピーダンスの周波数特性(共振特性)測定結果に基づきモデリングする必要がある。これには、可変周波数電源を用いる定常法と、インパルス電流または電圧印加時の過渡応答を用いる手法である。目的とする回路が線形であれば、後者により得られた時間応答はフーリエまたはラプラス変換により周波数特性を得ることができる。これらの応答は理論的に等価である。

本章では、前者である定常法を用いる。これは、インピーダンスボンドはレール等とは異なり、比較的小型の装置で実験室での試験も可能であり、過渡応答から周波数特性を得るに必要な数値周波数変換時の数値誤差の影響を避けることができるためである。なお、インパルス電圧に対する過渡応答から得られた周波数応答は、定常法によって得られたものと同一であることが確認されている⁽⁴²⁾。本章では、周波数領域すなわち定常法を用いるため、インピーダンスボンドは線形素子と仮定する。

鉄道信号システムは等価回路によって表現される。各要素の周波数特性は、インピーダンスボンドの共振を表現することにより考慮する。

提案モデルの精度は、EMTPの周波数スキャン機能によりインピーダンスボンドの各端子間インピーダンスにより検証すると共に、EMTPを用いた過渡応答シミュレーション結果と実測を比較することにより検証する。これにより、電力システムの過渡解析ツールとして開発されたEMTPが、軌道回路のサージ解析に有効であることを明らかとする。

8.2 インピーダンスボンドのモデリング

8.2.1 インピーダンスボンド

図 8.1 にインピーダンスボンドを示す⁽³⁾。2.4 節に示すようにインピーダンスボンドは一種の変圧器で、帰線電流を変換する 1 次巻線、信号電流を結合する 2 次巻線、信号電流を検知する 3 次巻線で構成され、1 次側にはレールに流れる帰線電流が流れるため 1 次側は図 8.1(b)に示すように極めて太い導体で構成される。レールの接続箇所は絶縁されているため、変電所への帰路電流は、隣接する区間にインピーダンスボンドの 1 次巻き線中点を介して電流が流れる。また、3 次側には信号設備に関する送受信機が接続されている。閉そく区間に列車が侵入すると送受信機を有する回路が短絡され、受信器には信号が受信されず、列車を検知することができる。この信号の周波数は直流き電在来線では一般的に商用周波数 (60 Hz, 50 Hz) が使用されるが、信号の検出感度を向上させるため、3 次巻線にキャパシタを接続し、励磁インダクタンスとの共振を利用する。図 8.1(c)にキャパシタを示す。なお、インピーダンスボンドの 1 次、2 次及び 3 次巻線の巻線比は 1:1:20 である。

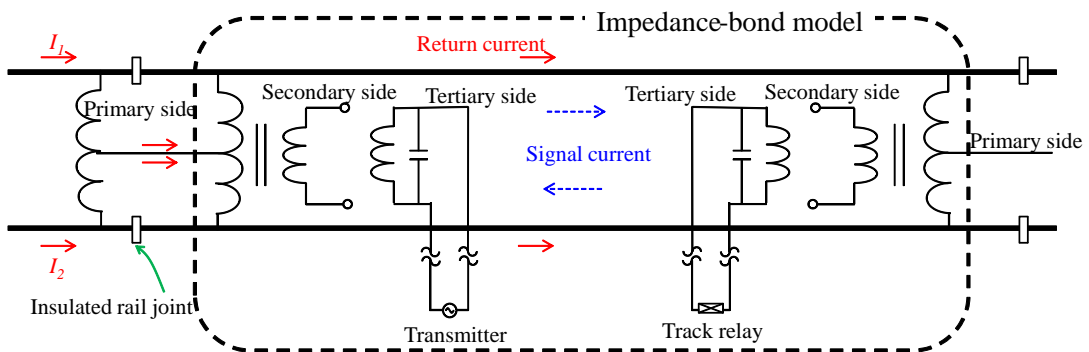


(a) 外観

(b) 内部



(c) インピーダンスボンド内のキャパシタ

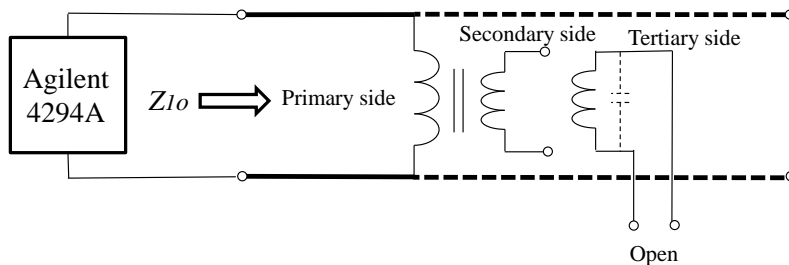


(d) インピーダンスボンドを含む結線

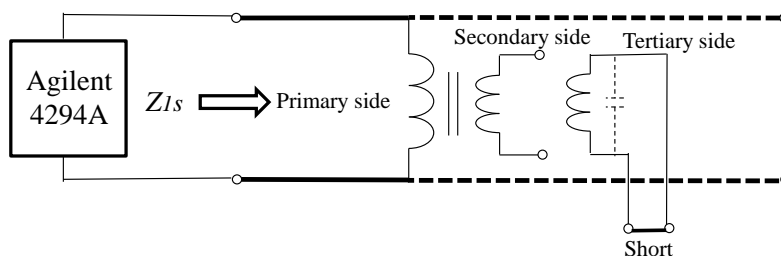
図 8.1 軌道回路の電流の流れ

8.2.2 インピーダンスボンド端子間インピーダンス

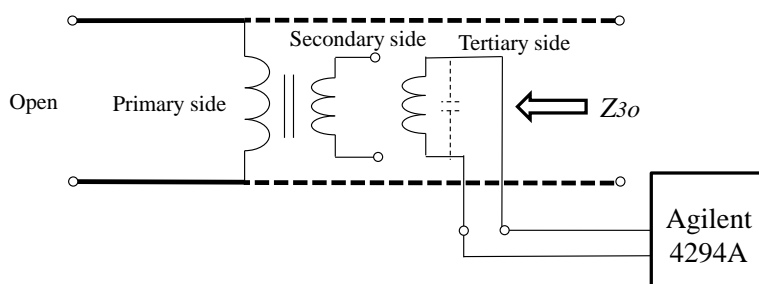
本項では1次側に雷サージが流入した場合に、3次巻線に接続されるキャパシタに誘導される電流や電圧の過渡特性を明らかにするインピーダンスボンドのモデル化について説明する。図 8.2 に測定回路図を示す。



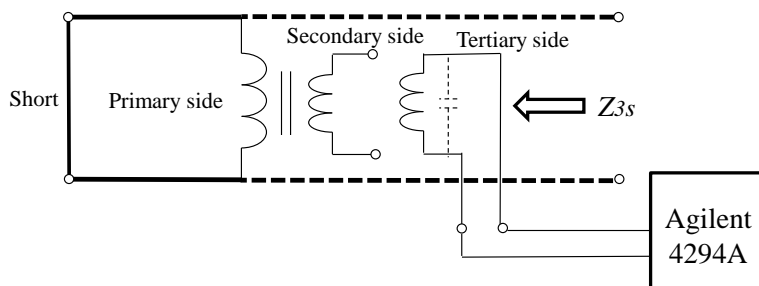
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4

図 8.2 インピーダンスボンド特性試験回路

表 8.1 に本節で検討を加える試番表を示す。Case 1 と 2 では 2 次側を開放し、3 次巻線を開放または短絡したときの 1 次巻線側から見たインピーダンスを測定した。Case 3 と 4 では、2 次側を開放し、1 次巻線を開放・短絡したときの 3 次巻線側から見たインピーダンスを測定した。これらの測定には、インピーダンスアナライザ Agilent 4294A を用い、測定周波数範囲は 20 Hz から 20 MHz とした。

表 8.1 インピーダンスボンド特性測定試番

	Primary side	Secondary side	Tertiary side
Case 1	Z_{1o}	Open	Open
Case 2	Z_{1s}	Open	Short
Case 3	Open	Open	Z_{3o}
Case 4	Short	Open	Z_{3s}

8.2.3 インピーダンスボンド特性試験の測定結果

図 8.3 は、雷サージ解析に重要となるインピーダンスボンド 1 次・3 次巻線モデル回路を示す。本回路は変圧器 T 型等価回路を基本とし、これに周波数特性を表現するいくつかの素子を付加したものである。励磁インダクタンス L_M は、いずれの巻き線側にも接続し得るが、このインダクタと 3 次巻線に取付けられたキャパシタ間の共振により信号電流を検知する重要な役割を担うため、3 次側に接続した。

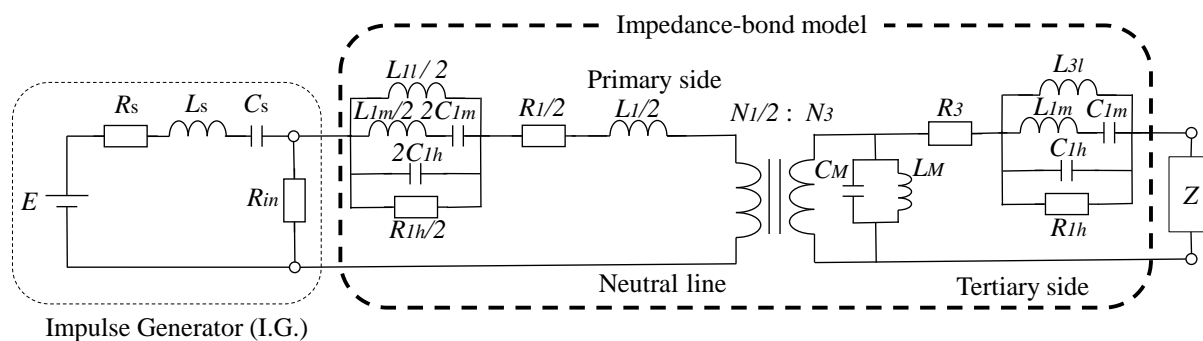


図 8.3 インピーダンスボンドモデル回路

図 8.4 に、各インピーダンスの実測値を示す。インピーダンス Z_{kx} は、巻線 k から見た駆動点インピーダンスを示す。第 2 の添字「O」または「S」は、他方の巻線（3 次または 1 次）が開路または短絡の状態を示している。

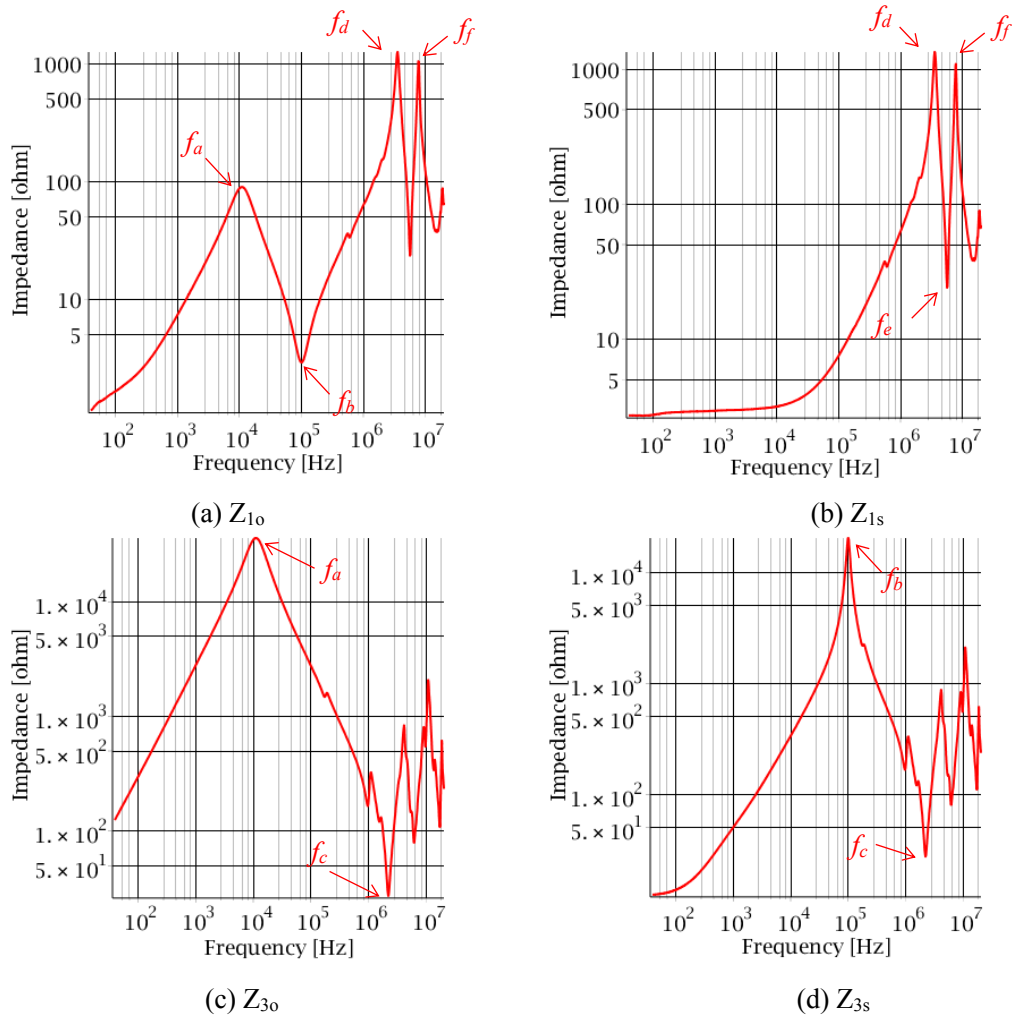


図 8.4 インピーダンスボンド端子間インピーダンス実測結果

8.2.4 インピーダンスボンド等価回路定数

図 8.4(a)より、3 次側開放時 1 次側駆動点インピーダンス Z_{1o} は周波数 $f_a = 10.9$ kHz で反共振点を有することが観測される。この共振は、3 次側短絡時 Z_{1s} では確認されない。これは、反共振が 3 次巻線に依存することを示している。この反共振は、図 8.4(c)に示す 1 次側開放時の 3 次側駆動点インピーダンス Z_{3o} においても観測される。よって、この反共振は、励磁インダクタンス L_M と 3 次巻線 C_M の浮遊容量間で発生する反共振であることが知られる。周波数 $f=30$ kHz のインピーダンス $|Z_{3o}|=7$ k Ω より、キャパシタンスは(8.1)式で得られる。

$$Y_{3o}(f)|_{f=30\text{kHz}} = \frac{1}{Z_{3o}(f)|_{f=30\text{kHz}}} = G_m + j2\pi f C_{w3}|_{f=30\text{kHz}} \quad (8.1)$$

$$C_{w3} = \frac{\text{Im}(Y_{3o}(f))}{2\pi f}|_{f=30\text{kHz}} = 0.7 \text{ nF}$$

またこの反共振周波数以下におけるインピーダンス Z_{10} は、 Z_{30} の $1/400$ である。この比率は、巻線比(N^2)の2乗である。したがって低周波領域ではインピーダンスポンドは変圧器モデルで表現できることを示している。励磁インダクタンス L_M は、反共振の周波数 f_a または Z_{30} の低周波数領域のインピーダンスから得られる。前者によれば以下となる。

$$L_m = \frac{1}{(2\pi f_a)^2 C_{w3}} = 0.32 \text{ H} \quad (8.2)$$

図 8.4 (a), (d)では周波数 $f_b = 100 \text{ kHz}$ においてそれぞれ共振と反共振が確認される。これは、1次巻線(漏れ)インダクタンスと3次側巻線間の浮遊容量による共振、反共振である。このキャパシタンスは、共振周波数とキャパシタンス C_M の1次側換算値により算出できる。

$$L_1 = \frac{1}{(2\pi f_b)^2 C_{w3} N^2} = 9 \mu\text{H} \quad (8.3)$$

共振の最小インピーダンスから、1次巻線抵抗 $R_1=4 \Omega$ が得られる。図 8.4(c), (d)で観測される $f_c = 2.18 \text{ MHz}$ の共振は、巻線インダクタ L_3 とキャパシタ C_M の直列共振によるものである。巻線のインダクタンスは次式から得られる。

$$L_3 = \frac{1}{(2\pi f_c)^2 C_{w3}} = 8 \mu\text{H} \quad (8.4)$$

図 8.4(b)に示す Z_{1s} の共振は、反共振 $f_d = 3.6 \text{ MHz}$ と $f_f = 7.7 \text{ MHz}$ 間の $f_e = 5.7 \text{ MHz}$ から得られる。これらの共振は、図 8.5 に示す回路を用いて近似表現することができる。

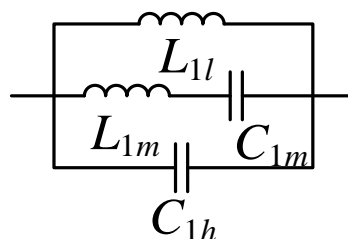


図 8.5 インピーダンスポンド1次側巻線インピーダンス高周波等価回路

共振周波数は、LC直列回路 L_{1m} , C_{1m} によって表すことができる。

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(L_{1l} + L_{1m})C_{1m} + C_{1h}L_{1l} - \sqrt{(L_{1l} + L_{1m})^2 C_{1m}^2 + 2C_{1h}L_{1l}(L_{1l} - L_{1m})C_{1m} + C_{1h}^2 L_{1l}^2}}{2C_{1h}C_{1m}L_{1l}L_{1m}}}$$

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{1m}L_{1m}}}$$

$$f_f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(L_{1l} + L_{1m})C_{1m} + C_{1h}L_{1l} + \sqrt{(L_{1l} + L_{1m})^2 C_{1m}^2 + 2C_{1h}L_{1l}(L_{1l} - L_{1m})C_{1m} + C_{1h}^2 L_{1l}^2}}{2C_{1h}C_{1m}L_{1l}L_{1m}}}$$
(8.5)

$L_{1l}=L_1$ と仮定し方程式を解くと、回路定数として以下の値を得ることができる。

$$C_{1h} = 156 \text{ pF}, \quad C_{1m} = 98.0 \text{ pF}, \quad L_{1m} = 10.3 \text{ }\mu\text{H}$$
(8.6)

f_e の周波数におけるインピーダンスから、その直列抵抗は $80 \text{ }\Omega$ となる。同様に、 Z_{3o} や Z_{3s} で観測される高周波領域の共振周波数の計算結果から等価回路定数が得られる。これらの定数を用いて EMTF の FREQUENCY SCAN 機能を使用して各駆動点インピーダンスを計算した結果を図 8.6 に示す。

図 8.4 に示す測定結果との比較より、インピーダンスボンドのインピーダンス周波数特性は雷サージ解析で重要となる周波数 20 kHz まで良好に再現できることが明らかである。

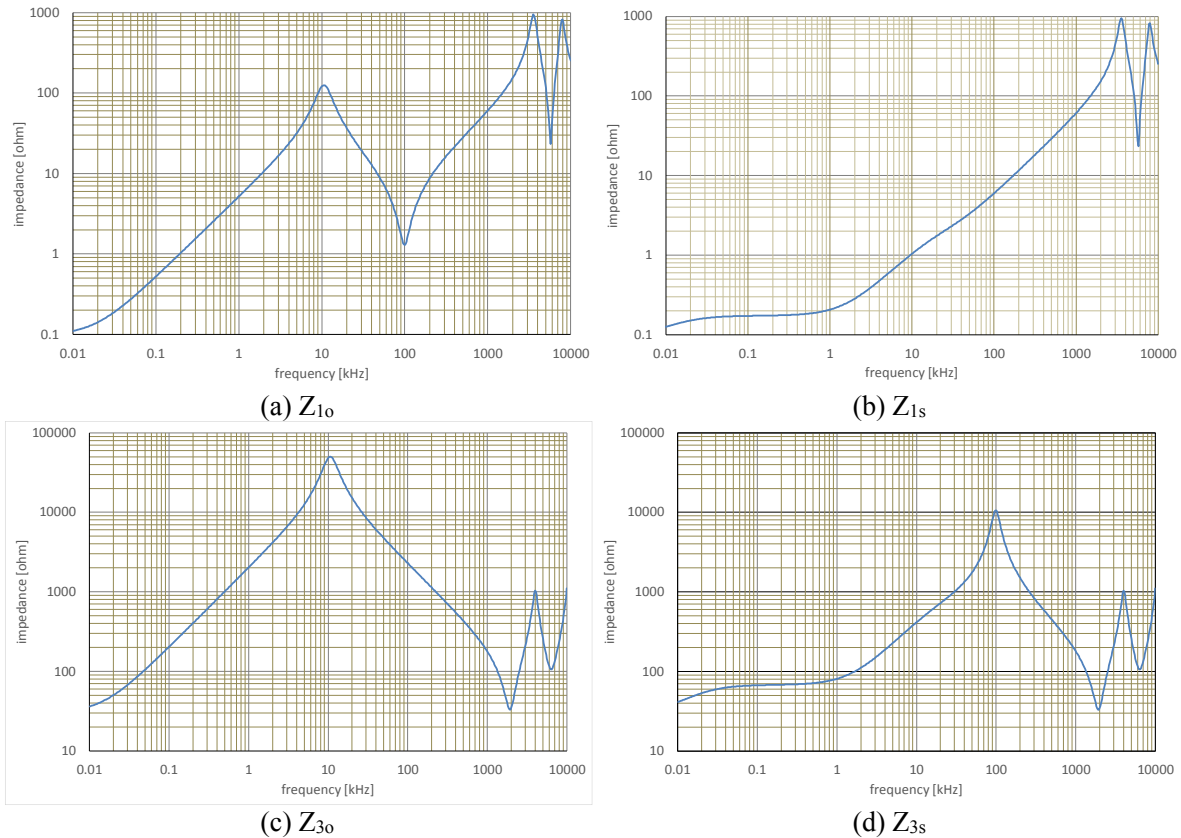


図 8.6 インピーダンスボンド端子間インピーダンス計算結果

図 8.7 に、3 次巻線に接続されたキャパシタの周波数特性を示す。これよりキャパシタは RLC 直列回路で表現可能である。このキャパシタは、低周波領域のインピーダンスから得ることができる。

$$C_{ex} = \frac{1}{|Z_{ex}| 2\pi f} \Bigg|_{f=100} = \frac{1}{40 \times 200\pi} = 40 \mu\text{F} \quad (8.7)$$

この値は仕様を示された値と等しい。インダクタンスは、共振周波数以上の高周波領域におけるインピーダンス、直列抵抗は共振点インピーダンスから得ることができる。

$$R_{ex} = \min |Z_{ex}| = 0.9 \Omega \quad (8.8)$$

$$L_{ex} = \frac{|Z_{ex}|}{2\pi f} \Bigg|_{f=10\text{MHz}} = 1.6 \mu\text{H} \quad (8.9)$$

よってインピーダンスボンド共振用キャパシタのサージインピーダンスは、

$$Z_{oex} = \sqrt{\frac{L_{ex}}{C_{ex}}} = 0.2 \Omega \quad (8.10)$$

と極めて小となる。

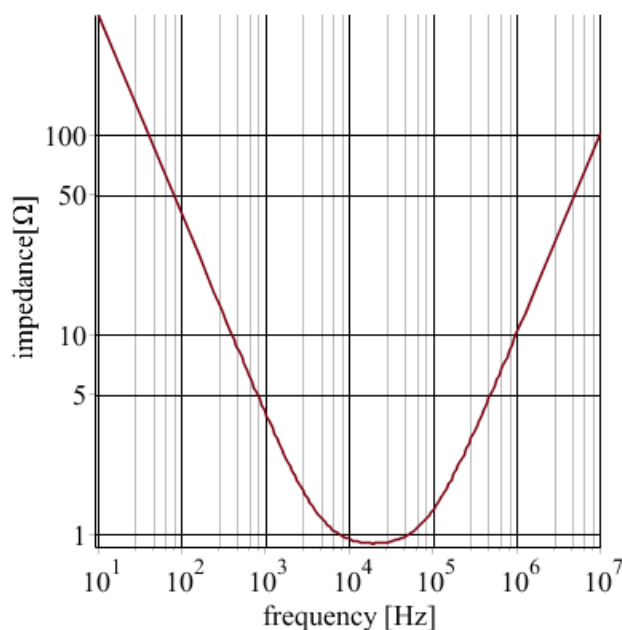


図 8.7 共振キャパシタの周波数特性に対するインピーダンス

8.3 インピーダンスボンドの雷サージ解析

インピーダンスボンドの雷サージ特性試験を実施し、その結果を EMTP を用いてシミュレーションする。試験においては、波頭長と波尾長はそれぞれ 1.2 および 50 μs である標準雷インパルス電圧波形 (1.2/50 μs) を、1 次側からインパルス発生器を使用して印加する。なお、振幅はインパルス発生器からの出力電流を 20A となるよう調整した。3 次側を開放した場合を Case 5、共振キャパ

シタを接続した場合を Case 6 とした。図 8.8 に試験回路，図 8.9 に各注入電流測定結果を示す。キャパシタを接続している Case 6 では，3 次巻線両端間電圧は，キャパシタが低インピーダンスであるため観測されない。このときキャパシタに流れる電流を図 8.10 に示す。図 8.9 (b)と図 8.10 から，1 次側に振幅 22 A の電流が流入した場合，キャパシタに 0.57 A の電流が流れる。

図 8.11，図 8.12 に実測結果と共に EMTP によるシミュレーション結果を破線で示す。シミュレーション結果は，3 次巻線に接続されるインピーダンスによらず実測波形を良好に再現できている。これより，提案したインピーダンスボンドモデルが特性を正確に再現し得ることが明らかとなった。

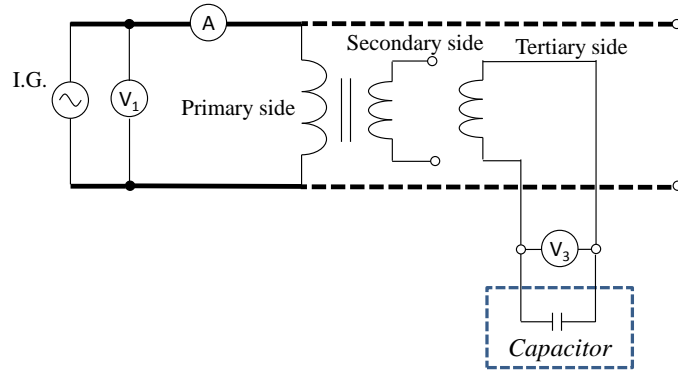
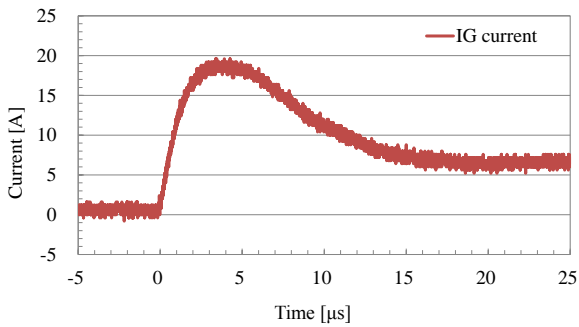
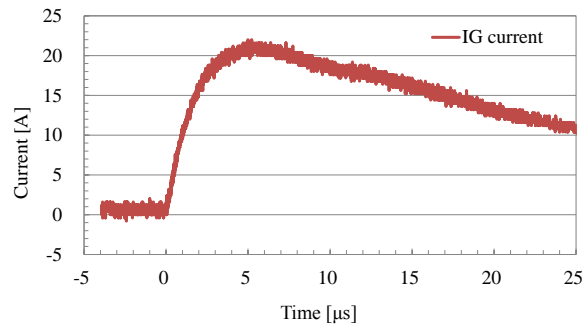


図 8.8 インピーダンスボンドの実測回路 (Case 5, Case 6)



(a) 3 次側キャパシタなし (Case 5)



(b) 3 次側にキャパシタあり (Case 6)

図 8.9 インピーダンスボンド過渡試験注入電流

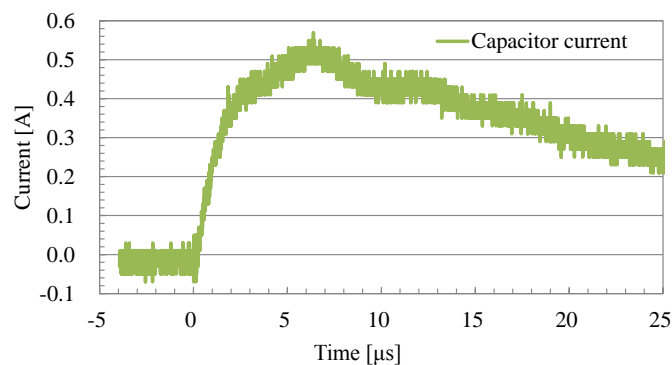
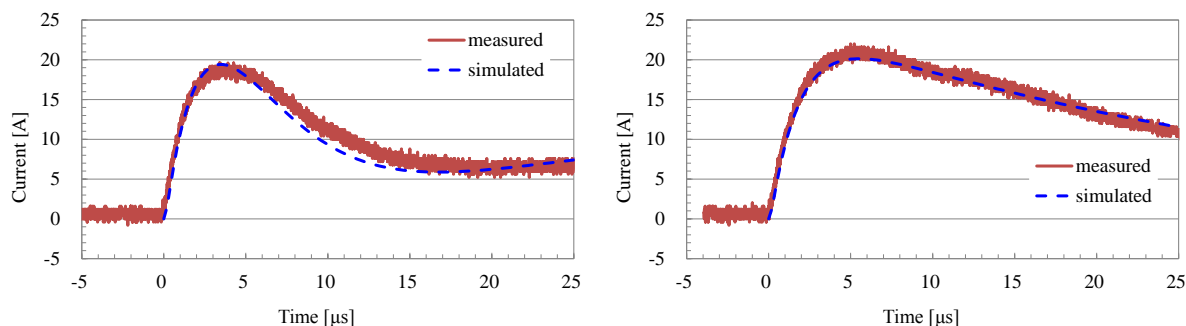


図 8.10 インピーダンスボンド共振キャパシタ電流 (Case 6)



(a) 3次側キャパシタなし (Case 5) (b) 3次側にキャパシタあり (Case 6)
 図 8.11 インピーダンスボンド過渡試験注入電流シミュレーション結果

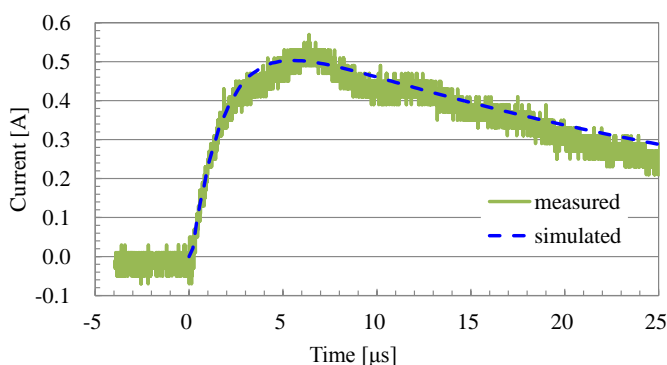


図 8.12 インピーダンスボンド共振キャパシタ電流シミュレーション結果

以上の結果から、3.4節で述べたインピーダンスボンドキャパシタの損傷は、20kAの雷電流を想定した場合、インピーダンスボンド共振キャパシタには約500Aの電流が流れることから説明できる。

8.4 まとめ

本章では、軌道回路に設置されたインピーダンスボンドの障害に着目し、その原因について検討を加えた。まず、インピーダンスボンドのサージ応答特性を表現し得るモデルを定常インピーダンス測定法により構築し、その精度を過渡応答試験とシミュレーション結果との比較により検証した。

レールを流れた雷電流がインピーダンスボンドに流入する際の雷サージは、本章で開発したインピーダンスボンドモデルを適用したEMTP解析により推定することが可能となった。これより、閉そく区間内に存在する列車の在線検知の感度を共振により向上させる共振キャパシタの焼損の原因はキャパシタの耐電圧不足ではなく、キャパシタに流れる雷電流によるものであることが明らかとなった。

また、EMTPは電力システムの過渡現象解析ツールとして開発されているが、系統解析と同様に、軌道回路の雷サージ解析を行う効果的なツールであることも明らかとなった。

9章 鉄道用レール周波数依存線路モデル

9.1 はじめに

近年、鉄道信号設備に電子機器が数多く導入された。これらの機器は高性能であるが耐電圧が低く、雷による故障・損傷の被害が増加している。これら被害の中でもレールと電氣的に接続されている設備に生ずる被害は、レールを介して侵入する雷サージが原因と想定し得る。また絶縁設計等の雷害対策検討にあたり、実規模におけるフィールド試験を行う手法があるが、多大な時間と労力を必要とするのみならず、多くの場合設備の制限より検討範囲が限定される。一方、数値解析は、各パラメータを容易に変更でき、費用や所要時間も軽減できる。そのため、弱電設備に生ずるサージの高精度計算に適用し得るレールのモデリング法が求められている。

雷サージの観測時間は例えば $1\ \mu\text{s}$ と極めて短時間となることもあるが、この間に伝搬速度を光速とする電磁波は $300\ \text{m}$ 進み、鉄道用レール 1 本の巨長と概ね等しくなり、雷サージ解析において、レールは分布定数線路として表現する必要がある。またレールは、複雑な断面を有し、バラスト上にまくらぎを介して敷設されている特殊導体である。現在提案されているモデルは、架空線路を表現するために作成されたある周波数における定数で表した線路を分割して、まくらぎによるアドミタンスを集中的に付加する構成としている⁽⁴⁶⁾。しかしこのモデルの線路インピーダンスは、レールが地上に近接して敷設されているにも関わらず、線路高が線路半径に比して大である架空線定数計算法を用いている。また比透磁率が 70 等の磁性材料であるレールは周波数が数 Hz で表皮厚さ $\sqrt{\rho/\omega\mu}$ がレール幅と同程度となり表皮効果が顕著に表れるため⁽⁴⁷⁾、サージ解析では周波数依存効果を考慮できるモデルを適応すべきである。また従来モデルでは $50\ \text{m}$ の軌道回路を 8 分割してモデルを作成しているため、コンピュータの計算時間刻みを小としなければならず回路も煩雑となる。

本章では、まず鉄道用レールの線路定数を計算する手法を提案する。次に、周波数依存効果を表現し得る Semlyen 線路モデル（再帰コンボリューションモデル）を用いて、レールを均質線路として表現する手法を提案する。これら提案法は、従来モデルと比して計算精度の向上のみならず、モデルの簡略化に寄与し、電気鉄道システムの雷サージ対策に貢献する。なお、これら提案モデルの精度は、実レールを用いたフィールド試験により検証する。

9.2 鉄道用レールの等価均質線路

鉄道用レールを一定区間毎に設置されるまくらぎを介して敷設されている非均質対称 2 相線路とする。ノード 0 を始端、ノード n を終端とした軌道回路において、距離 Δl 毎にまくらぎが $n+1$ 個敷設されているとする。まくらぎを含むレールを対称回路の縦続接続として表現するために、図 9.1 (a)に示すように、各ノードのまくらぎを二分割する。

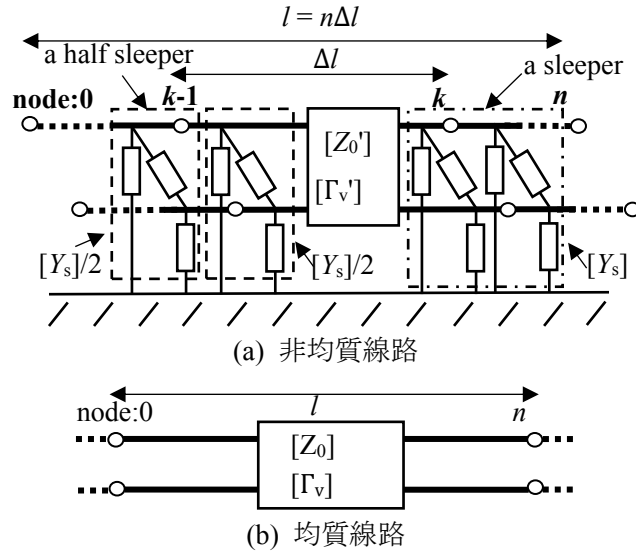


図 9.1 まくらぎを考慮したレールの分布定数線路モデル

まくらぎ間のレールを表す線路四端子行列を $[F_r]$ 、二分割したまくらぎの四端子行列を $[F_s]$ とし、ノード $k-1$, k 間の非均質対称回路四端子行列を $[F_l]$ とすると次式が得られる。

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} V_{k-1} \\ I_{k-1} \end{pmatrix} &= [F_l] \begin{pmatrix} V_k \\ I_k \end{pmatrix} \\
 [F_r] &= \begin{bmatrix} \cosh([\Gamma'_v] \Delta l) & \sinh([\Gamma'_v] \Delta l) [Z'_0] \\ [Y'_0] \sinh([\Gamma'_v] \Delta l) & [Y'_0] \cosh([\Gamma'_v] \Delta l) [Z'_0] \end{bmatrix} \\
 [F_r] = [F_s] [F_r] [F_s], \quad [F_s] &= \begin{bmatrix} [U] & [0] \\ [Y_s]/2 & [U] \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{9.1}$$

ただし $[Y_s]$ はまくらぎのアドミタンス行列, $[Z'_0]$, $[Y'_0]$ はレールの特性インピーダンス及び特性アドミタンス, $[\Gamma'_v]$ はレールの伝搬定数, (V_k) , (I_k) はそれぞれノード k の電圧, 電流, $[U]$ は 2×2 単位行列である。

(9.1)式で表現される四端子行列 $[F_r]$ を n 乗することで n 段従属接続された系全体のすなわちまくらぎを考慮したレールの等価四端子行列 $[F]$ を求めることができる。

一般にまくらぎは約 600 mm 間隔で配置されている。従来測定されたレールを伝搬する進行波の速度は対地間で $55 \sim 90 \text{ m}/\mu\text{s}$ であり⁽⁴⁶⁾, この値を用いるとまくらぎ間の往復伝搬時間は $13.3 \sim 21.8 \text{ ns}$ である。この系をまくらぎ間のレールを分布定数線路で表現して解析するならば時間刻みは 13.3 ns より十分小とする必要がある。そこでまくらぎを含めてレールを等価的に均質線路で取り扱くと, 回路が簡易になり時間刻みを大とすることができる。

レールが有する線路並列アドミタンスを $[Y_r]$ とおくと, まくらぎを含む系全体の単位長当たりの平均並列アドミタンス $[Y]$ は次式で表現される。

$$[Y] = [Y_r] + [Y_s] / \Delta l \tag{9.2}$$

上式の並列アドミタンスを均質線路理論に適用することで、簡易に非均質線路を等価均質線路で表現できる⁽⁴⁸⁾。系全体の特性インピーダンスを $[Z_0]$ 、特性アドミタンスを $[Y_0]$ 、伝搬定数を $[\Gamma_v]$ とすると、系全体の等価四端子行列 $[F]$ が導出される。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} (V_0) \\ (I_0) \end{pmatrix} &= [F] \begin{pmatrix} (V_n) \\ (I_n) \end{pmatrix} \\ [F] &\approx \begin{bmatrix} \cosh([\Gamma_v]l) & \sinh([\Gamma_v]l)[Z_0] \\ [Y_0]\sinh([\Gamma_v]l) & [Y_0]\cosh([\Gamma_v]l)[Z_0] \end{bmatrix} \\ [Z_0] &= [Y_0]^{-1} = \sqrt{[Z][Y]^{-1}}, \quad [\Gamma_v] = \sqrt{[Z][Y]} \end{aligned} \quad (9.3)$$

上式の行列を表現する等価モデルを図 9.1 (b)に示す。

ここで関数演算を容易にするため、実領域で表現されている線路定数を(9.4)式に示す電圧変換行列 $[T_v]$ 、電流変換行列 $[T_i]$ によりモード領域に変換する。ここで、それぞれの行列において1列目は大地帰路モード、2列目は線間波モードを表す。

$$\begin{aligned} (I) &= [T_i](i), \quad (V) = [T_v](v) \\ [T_i] &= \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad [T_v] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9.4)$$

上式において、 (I) 、 (V) はそれぞれ実領域の電流、電圧、 (i) 、 (v) はモード領域電流・電圧で、以降では原則実領域物理変数は大文字で、モード領域の物理定数を小文字で表す。

(9.4)式に示す変換行列を(9.3)式に適用すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} (v_0) \\ (i_0) \end{pmatrix} &= \begin{bmatrix} [f_{11}] & [f_{12}] \\ [f_{21}] & [f_{22}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (v_n) \\ (i_n) \end{pmatrix} \\ [f_{11}] &= [T_v]^{-1} \cosh([\Gamma_v]l) [T_v] \\ [f_{12}] &= [T_v]^{-1} \sinh([\Gamma_v]l) [Z_0] [T_i] \\ [f_{21}] &= [T_i]^{-1} [Y_0] \sinh([\Gamma_v]l) [T_v] \\ [f_{22}] &= [T_i]^{-1} [Y_0] \cosh([\Gamma_v]l) [Z_0] [T_i] \end{aligned} \quad (9.5)$$

更にこの式を変形すると次式が導出され、各行列要素は対角行列で表わされるモード領域変数となる。

$$[f] = \begin{bmatrix} \cosh([\gamma_v]l) & \sinh([\gamma_v]l)[z_0] \\ [y_0]\sinh([\gamma_v]l) & \cosh([\gamma_v]l) \end{bmatrix} \quad (9.6)$$

9.3 鉄道用レールの周波数依存線路モデル

9.3.1 線路直列インピーダンス

線路直列インピーダンス $[Z]$ は導体内部インピーダンス $[Z_c]$ 、大地帰路インピーダンス $[Z_e]$ 、空間インピーダンス $[Z_s]$ の和で定まる⁽⁴⁹⁾。

円筒導体の導体内部インピーダンスは、表皮効果を考慮した厳密式が Schelkunoff により提案されている⁽⁵⁰⁾。また大地帰路インピーダンスは Carson, Pollaczek により周波数依存効果を考慮した厳密式⁽⁵¹⁾⁽⁵²⁾、Deri によりこの近似式が提案されている⁽⁵³⁾。これらは、線路高が線路半径に比して十分大きいと仮定しており、架空線路の計算に適用することを想定している。一方で、レールは架空線路と異なり複雑な断面を有し、線路半径と線路高は同程度で架空線路の定数計算を直接適用し得ない。

本章では(9.7)式を用いて、レールを外周と断面積が等しい等価円筒導体と近似する⁽⁵⁴⁾。高周波領域において電流は表皮効果により導体表面近傍を流れる。そのため外周を等しくすれば導体表面からの複素等価深度を用いて、近似的に高周波領域で流れる電流分布を表現できる。また、断面積を等しくすることで直流抵抗が等しくなる。

$$S_{mea} = \pi(r_o^2 - r_i^2), \quad l_{mea} = 2\pi r_o \quad (9.7)$$

ただし、レールの実断面積を S_{mea} 、外周を l_{mea} 、等価円筒導体外半径を r_o 、等価内半径を r_i とする導体内部インピーダンス Z_c は Schelkunoff により提案された(9.8)式で表現する。

$$Z_c = \frac{j\omega\mu_c I_0(r_o)K_1(r_i) + K_0(r_o)I_1(r_i)}{2\pi r_o I_1(r_o)K_1(r_i) - K_1(r_o)I_1(r_i)} \quad (9.8)$$

ただし、 μ_c は導体の透磁率、 I_0 、 I_1 は第 1 種変形ベッセル関数、 K_0 、 K_1 は第 2 種変形ベッセル関数である。

大地を分布して流れる大地帰路電流が、大地面から複素等価深度 h_e だけ低い位置を集中的に流れると仮定する⁽⁵⁵⁾。これに映像法を適用することで、(9.9)式により空間インピーダンスと大地帰路インピーダンスが導出される。

$$\begin{aligned} Z_{ss} + Z_{es} &\approx j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left\{ \frac{2(h+h_e) - r_o}{r_o} \right\}, h_e = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma_e}} \\ Z_{sm} + Z_{em} &\approx j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left\{ \frac{\sqrt{(2h+2h_e)^2 + w^2} - r_o}{w - r_o} \right\} \end{aligned} \quad (9.9)$$

ただし、 Z_{ss} は空間インピーダンスの自己成分、 Z_{sm} は空間インピーダンスの相互成分、 Z_{es} は大地帰路インピーダンスの自己成分、 Z_{em} は大地帰路インピーダンスの相互成分、 w を線路幅、 μ_0 を真空の透磁率、 σ_e を大地の導電率、大地と真空の誘電率は等しく、空気の導電率は零とする。

(9.9)式は、線路高 h が外半径 r_o に対して十分大きい時 Deri の近似式と同一となる。

9.3.2 線路並列アドミタンス

本項では、レールやまくらぎ、バラストの幾何学的配置を考慮し、線路並列アドミタンスを導出する実験手法を提案する。ここでは、一般的である木製のまくらぎ、道床はバラストで構成されている軌道を想定する。図 9.2 にまくらぎ部の等価回路を示す。木製まくらぎは主成分が木であるため、キャパシタと抵抗の並列回路⁽⁵⁵⁾、バラストは抵抗 R_{gs} で表現した。バラストを含むまくらぎの

単位長あたりの対地, 相互アドミタンスをそれぞれ Y_{gs} [S/m], Y_{ms} [S/m] とする。レール全体の対地, 相互アドミタンスを Y_g [S/m], Y_m [S/m] とすると(9.10)式が成り立つ。

$$Y_g = Y_{gs} + Y_{gr}, \quad Y_m = Y_{ms} + Y_{mr} \quad (9.10)$$

ただし, Y_{gr} と Y_{mr} は線路の幾何学的配置で定まる空間キャパシタンスであり, 映像法により理論的に導出できる。

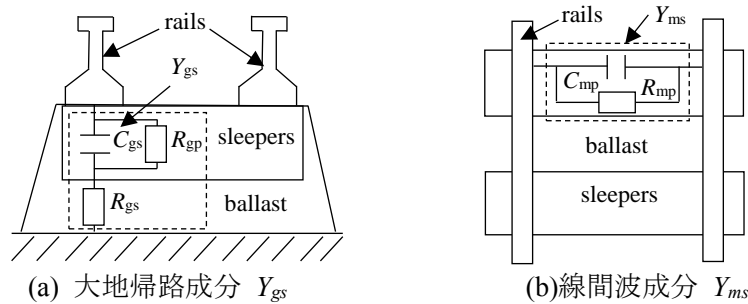


図 9.2 まくらぎの集中定数等価回路

次にこれらレールの並列アドミタンス測定法について述べる。波長が線路長の4倍となる周波数より十分低い領域では, 図 9.3 で示すようにレールを近似的に集中定数回路で表現できる。レール終端開放時における大地帰路成分 (レール終端短絡時の対地) インピーダンスと線間波成分 (レール終端開放時のレール間) インピーダンスをそれぞれ Z_{zo} , Z_{do} とすると次式が成り立つ。

$$\frac{1}{Z_{zo}} \approx 2Y_g l, \quad \frac{1}{Z_{do}} \approx \left(Y_m + \frac{Y_g}{2} \right) l \quad (9.11)$$

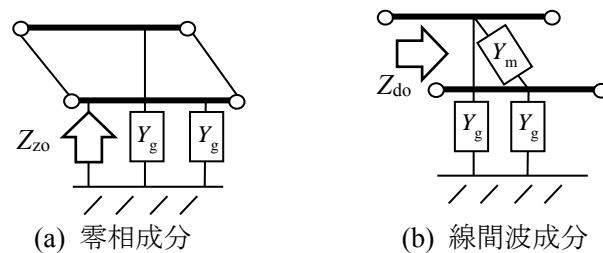


図 9.3 レールアドミタンスの実測時の等価回路

9.3.3 Pade 近似を用いた Semlyen 線路モデル合成

EMTP は, 畳み込み積分を用いて線路の周波数依存効果を考慮する Semlyen 線路モデルを有する⁽⁵⁶⁾。Semlyen 線路モデルを EMTP に組み込むためには, 各モードの特性アドミタンスと進行波伝搬特性の単位関数応答を指数関数近似した際の極 (時定数の逆数) と留数 (係数) が必要である⁽⁵⁶⁾⁽⁵⁸⁾。これらは特性アドミタンス, 進行波波形変歪の単位関数応答を指数関数近似した際の時定数の逆数と係数に対応する。EMTP には Semlyen Setup と呼ばれる Semlyen 線路モデルに必要なパラメータを, 周波数領域において非線形最小 2 乗法を用いて導出するプログラム SEMLYEN SETUP が組み込まれている。このプログラムは架空線路あるいはケーブル定数を計算する LINE CONSTANTS あ

るいは CABLE CONSTANTS, CABLE PARAMETERS を内部で呼び出し、その計算結果を利用している。なお、これら線路定数計算プログラムは、導体が絶縁されていることを仮定しており、レールのような漏れコンダクタンスを有する線路の定数計算には適用し得ない。また、SEMLYEN SETUP も絶縁導体の特性表現に最適化されている。したがって、EMTP の有するサブルーチンでは、レールの Semlyen 線路モデルを構築できない。

本章では、非線形最小 2 乗法を用いることなく、ラプラス演算子 s の関数に対して Taylor 展開に基づく有理関数近似法の一つである Pade 近似を適用し、Semlyen 線路モデルを導出する。

特性アドミタンス $Y_o(s)$ と進行波伝搬特性 $G_m(s)$ がラプラス演算子 s の関数で与えられている場合、それぞれに Pade 近似を適用すると(9.12)式が得られる。

$$Y_o(s) \approx \frac{\sum_{i=0}^N p_i s^i}{\sum_{i=0}^N q_i s^i}, \quad \frac{G_m(s)}{\exp(-s\tau)} \approx \frac{\sum_{i=0}^{M-1} p_i s^i}{\sum_{i=0}^M q_i s^i}$$

$$Y_o(s) = y_o + \sum_i^N \frac{r_{yi}}{s - p_{yi}}, \quad \frac{G_m(s)}{\exp(-s\tau)} = \sum_i^M \frac{r_{gi}}{s - p_{gi}} \quad (9.12)$$

ただし、 p_{yi} , r_{yi} は特性アドミタンスの実数極と留数、 p_{gi} , r_{gi} は波形変歪の実数極と留数、 y_o は周波数が無限大の特性アドミタンス、 τ は伝搬時間である。

更に(9.12)式を解析的に逆ラプラス変換する(9.13)式が導出される。

$$\mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{G_m(s)}{s} \right\}^{-1} = \sum_i^M \left(-\frac{r_{gi}}{p_{gi}} \right) \left[u(t - \tau) - \exp\{-(-p_{gi})(t - \tau)\} \right]$$

$$\mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{Y_o(s)}{s} \right\}^{-1} = y_o + \sum_i^N \left(-\frac{r_{yi}}{p_{yi}} \right) \left[u(t) - \exp\{-(-p_{yi})t\} \right] \quad (9.13)$$

ただし、 $u(t)$ は単位関数とする。

(9.13)式より、Pade 近似により得られた極と留数を用いて、単位関数応答を指数関数近似することができ、Semlyen 線路モデルに必要な定数を得ることができる。

9.4 提案レールモデルの精度検証

9.4.1 レール過渡応答フィールド試験

レールのサージ伝搬特性を測定するためフィールド試験を実施した。図 9.4 にフィールド試験回路図を示す。

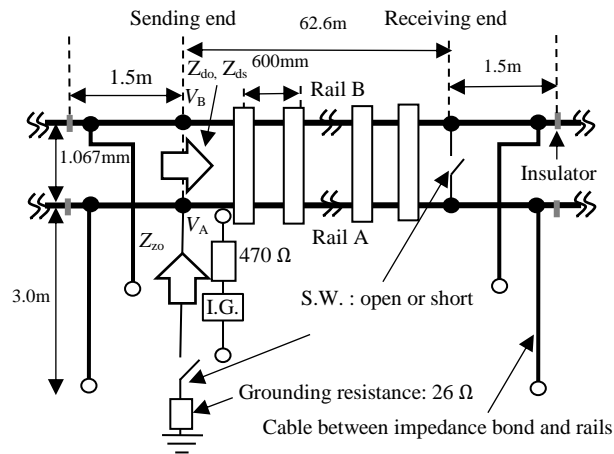


図 9.4 レール過渡特性フィールド試験回路

レール両端に接続されているインピーダンスボンドは、インピーダンスボンド側でケーブルを開放し、またその他のレールに接続されている設備も取り外した。表 9.1 に試験試番を示す。Case 1-3 では、インピーダンスアナライザを用いて周波数特性を測定した。Case 4 では、470Ωの抵抗を介してインパルスジェネレータ (I.G.)によりサージ電流を注入した際の送端印加側レール A の電圧 (V_A)、誘導側レール B の電圧 (V_B)をオシロスコープにより測定した。使用したレールは 50kgN であり、線路幅は狭軌、木製のまくらぎ、道床はバラストで構成されており、各パラメータを表 9.2 に示す。大地抵抗率は Wenner の四電極法に基づき測定を行った。

表 9.1 レールのサージ伝搬特性試験試番

試番	送信側		受信側		測定装置
	レール A-B	レール A-接地	レール A-B	レール A-接地	
1	$Z_{do}[\Omega]$	開放	開放	開放	インピーダンスアナライザ
2	$Z_{ds}[\Omega]$	開放	短絡	開放	
3	短絡	$Z_{zo}[\Omega]$	短絡	開放	
4	開放	I.G.	開放	開放	インパルス発生器

表 9.2 フィールド試験定数

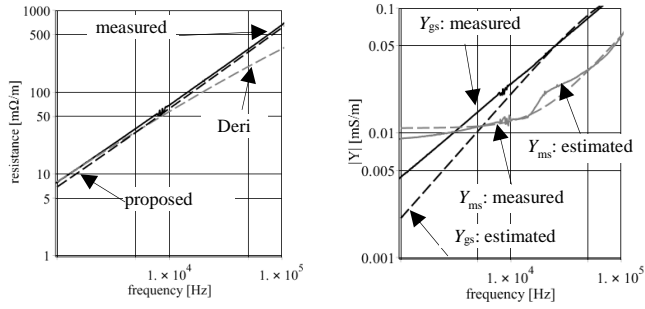
レール外周	[mm]	590
レール断面積	[mm ²]	6433
透磁率		70
レール高	[m]	0.100
レール幅	[mm]	1067
レール長	[m]	62.6
大地抵抗率	[Ω·m]	282
レール設置高	[m]	1.0
まくらぎ設置高	[m]	0.10

また(9.6)式に示すモード領域四端子パラメータにより(9.14)式が得られ、レールの線間波成分を実験的に導出できる。

$$\begin{aligned}
 Z_{d_o} &= z_{0[2,2]} \coth(\gamma_{v[2,2]} l), Z_{d_s} = z_{0[2,2]} \tanh(\gamma_{v[2,2]} l) \\
 z_{0[2,2]} &= \sqrt{Z_{1o} Z_{1s}}, \gamma_{v[2,2]} = \frac{1}{2l} \{ \ln(A) + j(\theta + 2n\pi) \} \\
 \left(\because \frac{\sqrt{Z_{d_o}} + \sqrt{Z_{d_s}}}{\sqrt{Z_{d_o}} - \sqrt{Z_{d_s}}} = A e^{j\theta} \right) \\
 z_{[2,2]} &= z_{0[2,2]} \gamma_{[2,2]}, y_{[2,2]} = \gamma_{[2,2]} / z_{0[2,2]}
 \end{aligned} \tag{9.14}$$

ただし、 Z_{d_o} は終端を開放した際の線間波形成分インピーダンス実測値、 Z_{d_s} は終端を短絡した際の線間波形成分インピーダンス実測値、 θ は偏角、 n はベクトルの回転数である。

(9.14)式に、Case 1 と 2 の実測結果を Z_{d_o} , Z_{d_s} 代入することにより線間波成分の特性インピーダンス $z_{0[2,2]}$, と伝搬定数 $\gamma_{v[2,2]}$ を導出した。これより等価線路直列インピーダンス $z_{[2,2]}$, $y_{[2,2]}$ が得られる。図 9.5 (a)に線間波成分の線路直列インピーダンス実測結果と(9.9)式に示す提案大地帰路インピーダンス近似式を用いた計算結果、線路高が十分に高いと仮定する架空線を対象とした Deri の近似式を用いた計算結果を示す。Deri の近似式に対して、提案式は高周波領域で精度が向上した。ただし、いずれも導体内部インピーダンスは(9.7)式により等価円筒導体と仮定し、(9.8)式に示す Schelknoff の式を用いた。更に Case 2 と 3 の実測結果 Z_{d_s} , Z_{z_o} を(9.10), (9.11)式に代入することでまくらぎ部のアドミタンス Y_{gs} , Y_{gm} を導出し、最小 2 乗法を用いて表 9.3 の回路定数を得た。これらの実測結果と計算結果を図 9.5 (b)に重ねて示す。ただし、試験日は真夏の快晴日であったため、大地に対するまくらぎの漏れ抵抗である R_{gp} は無視した。



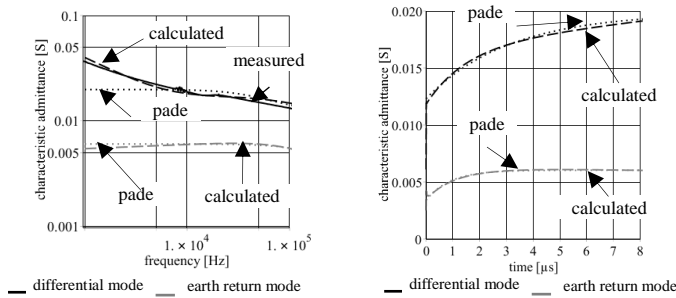
(a) 直列インピーダンス (b) まくらぎのアドミタンス

図 9.5 線路定数の実測および計算結果

表 9.3 まくらぎの等価回路定数

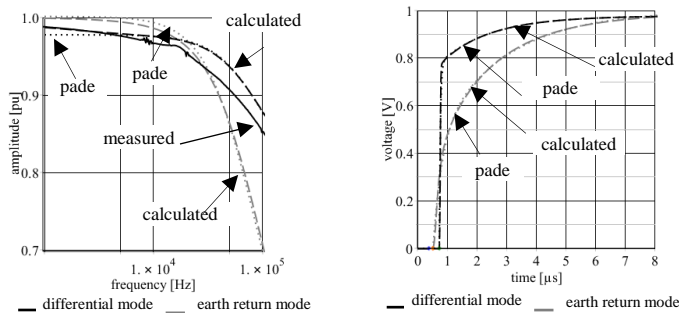
R_{gs} [$k\Omega \cdot m$]	C_{gs} [pF/m]	R_{gp}	R_{mp} [$k\Omega \cdot m$]	C_{mp} [pF/m]
6.67	274	-	91.7	97.4

図 9.6, 図 9.7 に周波数領域及び時間領域における特性アドミタンスと波形変歪の計算値, Pade 近似による近似値, 実測値を示す。また特性アドミタンス, 波形変歪に Pade 近似を適用した際に得られた極と留数をそれぞれ表 9.4, 表 9.5 に示す。図 9.6, 図 9.7 より本例では, 特性アドミタンスは 1 つの極で波形変歪は 2 つの極で十分に表現し得る。



(a) 周波数領域 (b) 時間領域単位関数応答

図 9.6 レール等価特性アドミタンス



(a) 周波数領域 (b) 時間領域単位関数応答

図 9.7 レールを伝搬する進行波波形変歪

表 9.4 レール等価 Semlyen 線路特性アドミタンス定数

mode	p_{y1}	r_{y1}	y_o
earth return	-1.12×10^5	2.96×10^3	3.40×10^{-3}
differential	-3.21×10^5	2.42×10^3	1.23×10^{-2}

表 9.5 レール等価 Semlyen 線路波形変歪定数

mode	p_{g1}	r_{g1}	p_{g1}	r_{g1}	τ [μ s]
earth return	-4.26×10^5	2.33×10^5	-3.32×10^6	1.51×10^6	0.522
differential	-5.78×10^5	1.15×10^5	-2.76×10^7	2.15×10^7	0.738

特性アドミタンス及び波形変歪の実測値と計算結果は良好に一致しており、提案計算法が十分な精度を有することが明らかである。架空線路とは異なり特性アドミタンスは、まくらぎやバラストによる漏れコンダクタンスを有するため、周波数の上昇に伴い低下、時間の経過に伴い上昇する誘導性を示している。

9.4.2 EMTP によるレール過渡応答シミュレーション

EMTP による提案レールモデルを用いたシミュレーション結果と、試番 4 の試験結果の比較を行った。

レールにはインピーダンスボンドとレール間のケーブルが接続されているため、解析にはこのケーブルを考慮する。

ケーブルの単位長当たりの静電容量 $C_b(=2\pi\epsilon_0\epsilon_r/\ln(r_2/r_1))$ はケーブルの比誘電率 $\epsilon_r(=2.25)$ 、ケーブルの内半径 $r_1(=11\text{mm})$ 、外半径 $r_2(=15\text{mm})$ 、ケーブル長 $l_b(=3\text{m})$ を乗ずると 1.2nF が得られる。図 9.8 にシミュレーション回路、図 9.9 に提案 Semlyen 線路モデル、周波数依存効果を厳密に表現し得る周波数変換法⁽⁵⁹⁾、200 kHz における定数を用いた定係数モデル、まくらぎを無視した計算結果と実測結果を示す。

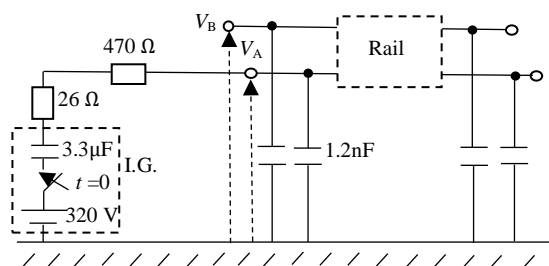
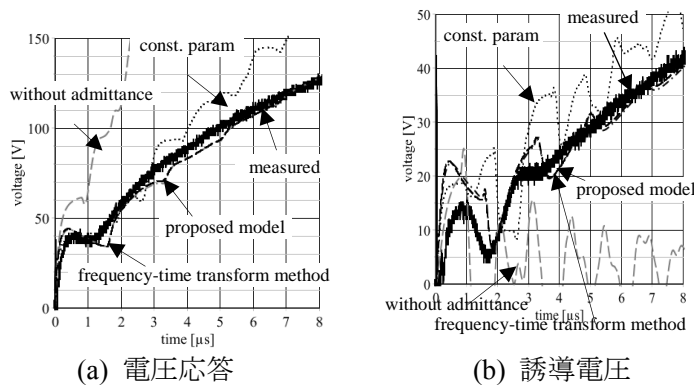


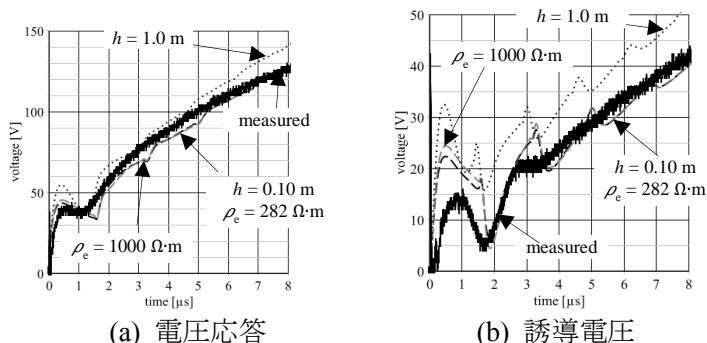
図 9.8 提案レールモデルを用いたシミュレーション回路



(a) 電圧応答 (b) 誘導電圧
 図 9.9 提案レールモデルのシミュレーション結果

提案モデルによる結果は、実測並びに周波数変換法による結果と一致し、本章で開発したモデリング法が十分な精度を有することが確認された。まくらぎによる線路アドミタンスは、レールのサージ伝搬特性に大なる影響を与えること、従来の定係数分布定数線路では、過渡応答を十分表現し得ないことが明らかとなった。

図 9.10 に各パラメータを変更した場合の結果を示す。レール高を地上面から定義($h=1.0\text{m}$)した場合は実測値に対し 25%以上の差異があるが、バラスト面($h=0.1\text{m}$)から定義した場合は、地上面とした場合よりも差異が小であることから、レールの線路高をバラスト面上から定めるべきである。また大地抵抗率を 3.5 倍し $1000\ \Omega\cdot\text{m}$ としても実測値 $282.6\ \Omega\cdot\text{m}$ の場合に対して 3%電圧が上昇するが、線路高と比して解析結果への影響は小である。



(a) 電圧応答 (b) 誘導電圧
 図 9.10 レール過渡応答に及ぼすレール線路定数の影響

9.5 まとめ

本章では鉄道用レールを等価均質線路で表現した。まくらぎやバラストによるレール波形伝搬特性の変化を、線路並列アドミタンスの増加分として表現することで均質線路理論を適用し得る。またこのアドミタンスを実験的に求める手法を提案した。次にレールの等価半径、等価高より線路直列インピーダンスを導出する近似式を導出した。この時、線路高はバラスト面上に取るべきである。

次にラプラス演算子 s で表現された線路定数に Pade 近似を適用することで解析的に EMTP Semlyen 線路モデルに必要な定数を導出した。本モデルの精度はフィールド試験により検証し実測結果と良好に一致することが確認された。以上より、EMTP は電力系統過渡解析のために作成されたが、提案モデルにより鉄道信号設備に生ずる高精度サージ解析に使用可能となった。

10章 変電所接地サージインピーダンスと周波数領域インピーダンス

10.1 はじめに

物理現象は時間領域の現象であり、本来この領域で説明されるべきものであるが、周波数領域で明瞭に説明される事象もある。例えば、インピーダンスは周波数領域における複素電圧と電流の比で定義され、定常解析に広く用いられている。また、複数の周波数で算出された周波数応答から時間領域に逆フーリエあるいは逆ラプラス変換する周波数変換法により、時間領域である過渡現象も解析することが可能である。一方、分布定数線路に沿って伝搬する進行波の電圧と電流の比としてサージインピーダンスあるいは特性インピーダンスが定義されている⁽²⁷⁾。厳密には周波数を無限大に近づけた場合の特性インピーダンスの収束値をサージインピーダンスと呼ぶ。

このサージインピーダンスは、分布定数回路で使用されるだけではなく、集中定数回路過渡現象においても時間領域で幅広く使用されている。5.2 節で述べたように、実数で表されるサージインピーダンスの定義は明確ではない。例えば、過渡電圧・電流それぞれの最大値の比とするものと電圧と電流を各時間で除して求める方法など、サージインピーダンスには様々な定義がある。

鉄道分野の接地設計は、これまでの定常接地抵抗から、雷害発生に伴う過電圧評価のためサージインピーダンスによる評価に移行しつつある⁽¹⁸⁾⁽³³⁾⁽³⁴⁾。雷害リスクが過少評価されれば鉄道の安全運行に支障をきたし、過大評価されれば過剰な設備投資に繋がる可能性もあり、適正な定量化管理手法の確立が望まれている。

そこで本章では、接地網、埋設地線、電力機器—接地網間接地線からなる電鉄用変電所の接地システムの測定結果を用いて、過渡応答評価として広く使用されている時間領域のサージインピーダンスと周波数領域のインピーダンスの関係をまず明らかにする。次に、サージインピーダンスを用いて雷害リスクを評価する際の注意点について検討する。

10.2 インパルス電流注入による変電所接地過渡電圧上昇の実測

本章では、ある新幹線用の交流電鉄用 A 変電所においてインパルス電流を接地網に注入し、注入点電圧の測定から、接地網インピーダンスを測定⁽¹⁸⁾⁽³³⁾⁽³⁴⁾した。図 10.1 に、変電所の機器配置図および測定点を示す。インパルス電流注入点は、き電側上り線用の避雷器 (ArU)、下り線用の避雷器 (ArD) および上り線用架空地線を接続する鉄構 (GWU) の、接地網に接続されている接地端子とした。本章で示す接地システムのインピーダンスとは、各接地端子から見た接地インピーダンスを表す。

注入電流波形が過渡応答に与える影響を確認するために、表 10.1 に示す雷インパルス電流を模擬する 2 つの電源 (以下、Pf, Ps) を使用し試験した。Pf は急峻な波頭部を持ち、Ps の波頭部は緩やかである。表 10.1 において、 T_f は波頭長、 T_l は波尾長、 I_{max} は電流の最大値および T_f の逆数を f_f とする。

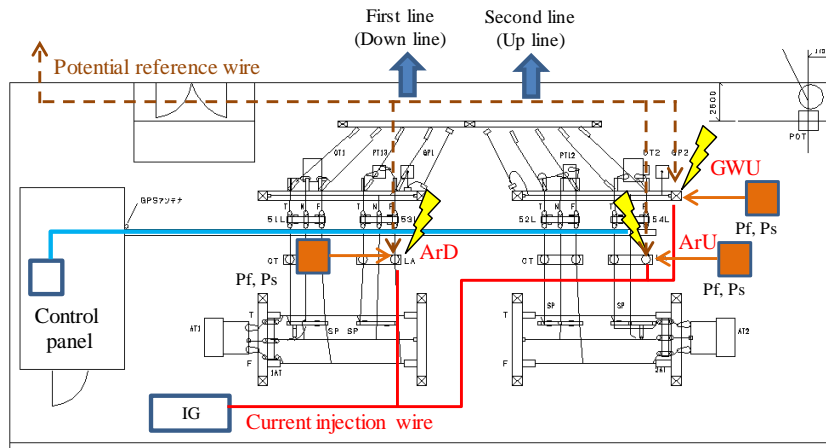


図 10.1 接地インピーダンスフィールド試験を実施した新幹線変電所

表 10.1 接地インピーダンス試験用電源波頭および波尾時間 (T_f and T_t)

	Pf	Ps
T_f [μ s]	0.93 ± 0	4.7 ± 0.4
T_t [μ s]	26.3 ± 0.4	68.2 ± 1.3
I_{max} [A]	3.04 ± 0.02	3.11 ± 0.02
$f_f (=1/T_f)$ [MHz]	1.1	0.21

電源は注入点近傍に配置し、電流注入点の電位は、印加点と変電所から 260 m 程度離れた位置で接地した電位基準線との電圧差として測定した。図 10.2 に、3 箇所注入した電流注入波形を電源ごとに重ねて示す。図 10.2 より、注入点によらず電流がほぼ等しいことから、これらの電源装置は電流源とみなすことができる。一般に電源から流出する電流 I_0 は開放電圧 V_0 と電源内部インピーダンス Z_i 、負荷インピーダンス Z_L により、 $I_0 = V_0 / (Z_i + Z_L)$ で与えられる。内部インピーダンス Z_i が負荷インピーダンス Z_L (本章では接地インピーダンス) より十分大であれば、出力電流は $I_0 \approx V_0 / Z_i$ となり、負荷によらず出力電流はほぼ一定となる。本章では、外部に接続した 1 k Ω の直列抵抗により内部インピーダンス Z_i を高め、定電流化を実現している。なお、両電源 Pf, Ps では、注入電流波高値が約 3 A となるように充電電圧を設定した。

図 10.3 に示す電流注入点電圧の実測波形より、波頭長が 0.93 μ s の電流を電源 Pf によって注入する場合には振動が観測されるが、波頭長が 4.7 μ s の電流を Ps によって注入する場合には、振動はほとんど観測されない。一方、測定点 ArD, ArU で観測される電圧の振動周期は、それぞれ 0.24 μ s (4.2 MHz), 0.3-0.4 μ s (2.5-3.3 MHz) である。また、GWU における電圧最大値は、他の端子のそれらよりも電源によらず 1/2 以下である。これは、接地網に接続される鉄構の接地線長さが ArD や ArU のそれと比較し、1/5 以下と短いことに起因する。

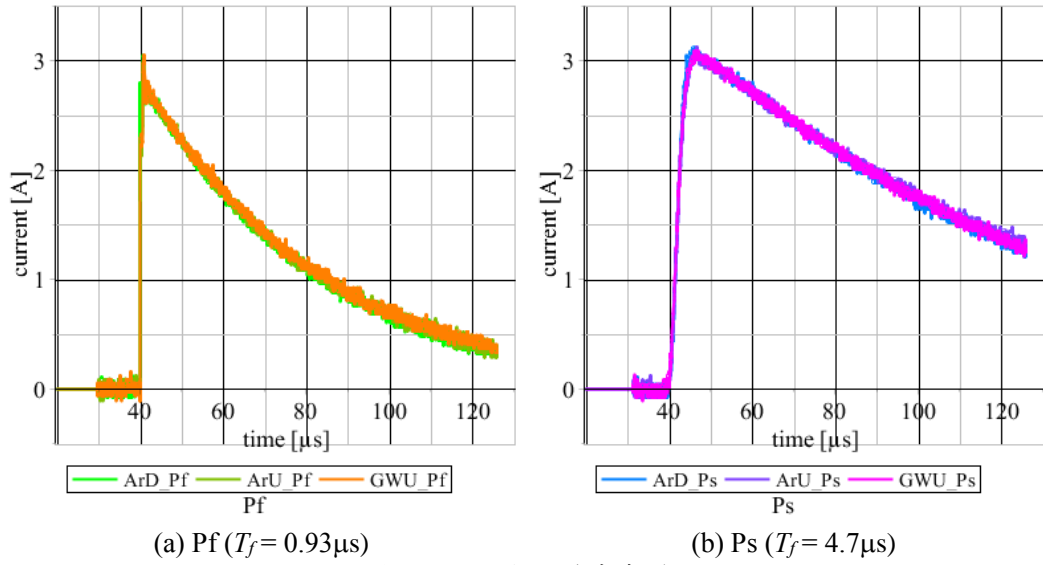


図 10.2 注入電流波形

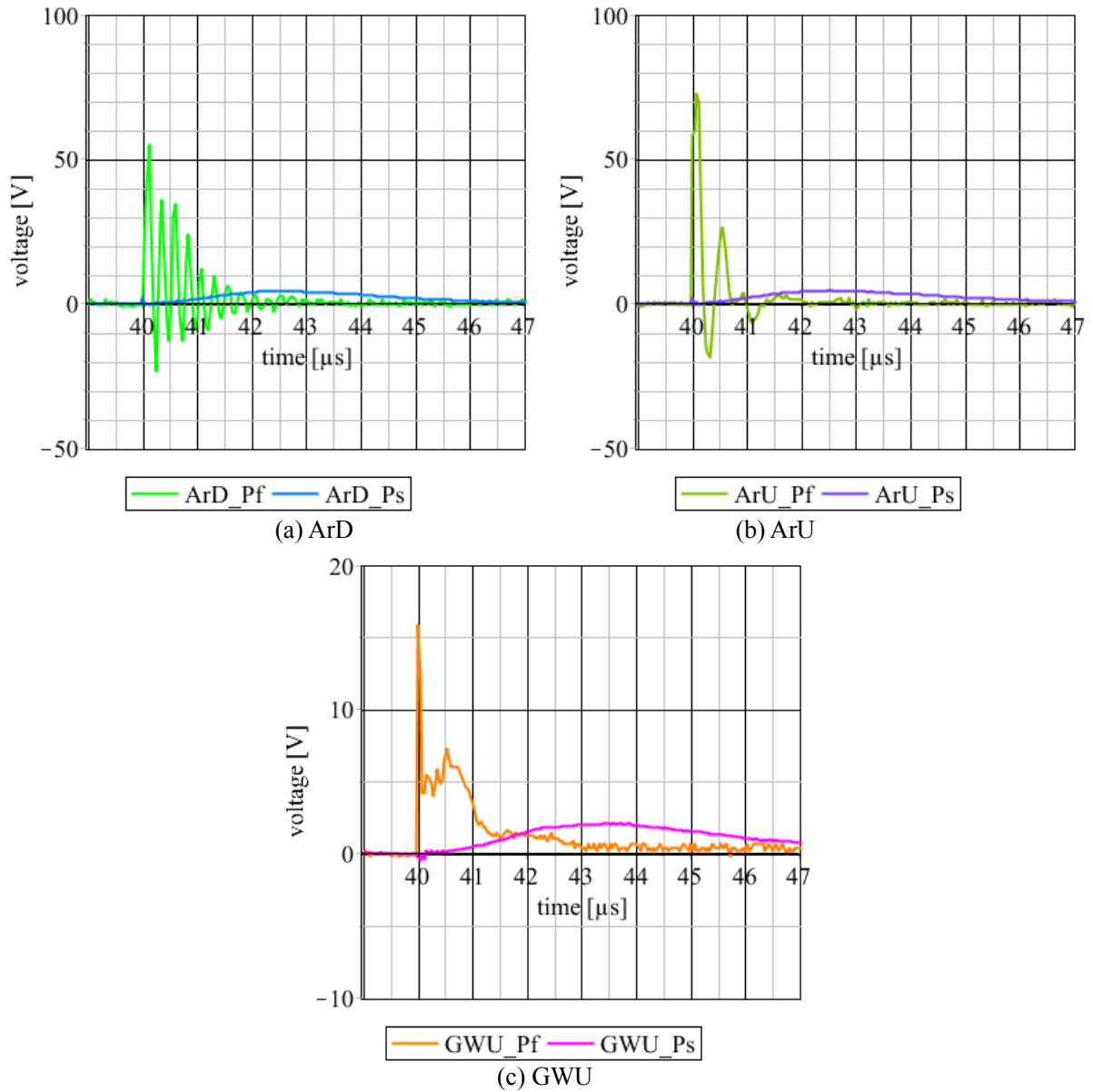


図 10.3 電圧の実測結果

10.3 周波数領域の注入電流と変電所接地電圧

図 10.4 に、サンプリング時間 40 ns (Δt)で得られた測定電流波形に 7.9 節で述べた直線近似数値ラプラス変換 (LLT) ⁽⁵⁹⁾を施し得られた周波数領域の注入電流の応答を示す。理論的な最大観測 (ナイキスト) 周波数 f_{max} は 12.5 MHz ($=1/2\Delta t$)である。図 10.4 (a)と(b)の比較から、高周波成分は、注入電流波形の波頭長の増加に伴い急激に減少することが観測される。電源 Pf によって得られた測定結果では 1 MHz, Ps では 0.3 MHz 以上の周波数領域の振動は、実測の不確かさに依存する。その原因の一つとして測定器のデジタル処理に伴う量子化誤差が考えられる。

本章で実施した測定には、デジタルオシロスコープ (日本テクトロニクス TPS2024) を使用している。この測定器の分解能は 256 (8 ビット) であるため、デジタルオシロスコープに入力された識別可能な信号の最小値と最大値の比率で決定されるダイナミックレンジは 42 dB ($=256/2$)程度となり、垂直軸の分解能は、正確な周波数特性を得ることができる周波数範囲を定める。すなわち、測定結果には真値に -40 dB 程度の乱数状ノイズが重畳していることになり、電流振幅が約 40 dB 低下した周波数以上の領域で振動的な特性となる。この周波数 f_f は、表 10.1 に示す波頭長の逆数 $1/T_f$ とほぼ等しい。

また図 10.4 から、変電所に立ち上がりが緩やかな雷電流が流入した場合、高周波領域における接地システムのインピーダンスは、雷害に対する影響は小であることを示している。例えば、図 10.4 (b)より波頭長が 4.7 μ s (P_s)の雷撃電流が変電所に侵入した場合の周波数 f_f (0.21 MHz)における電流成分は直流成分の 1/100 以下で、これより低い周波数成分が支配的となる。

図 10.4 (a)において、それぞれの電流応答の 1 MHz 近傍に窪みが確認できる。これは、Pf を電源として使用した際の固有の特徴であり、この電源の内部回路によるものである。この窪みのインピーダンスに与える影響については、電圧応答と合わせて後に述べる。

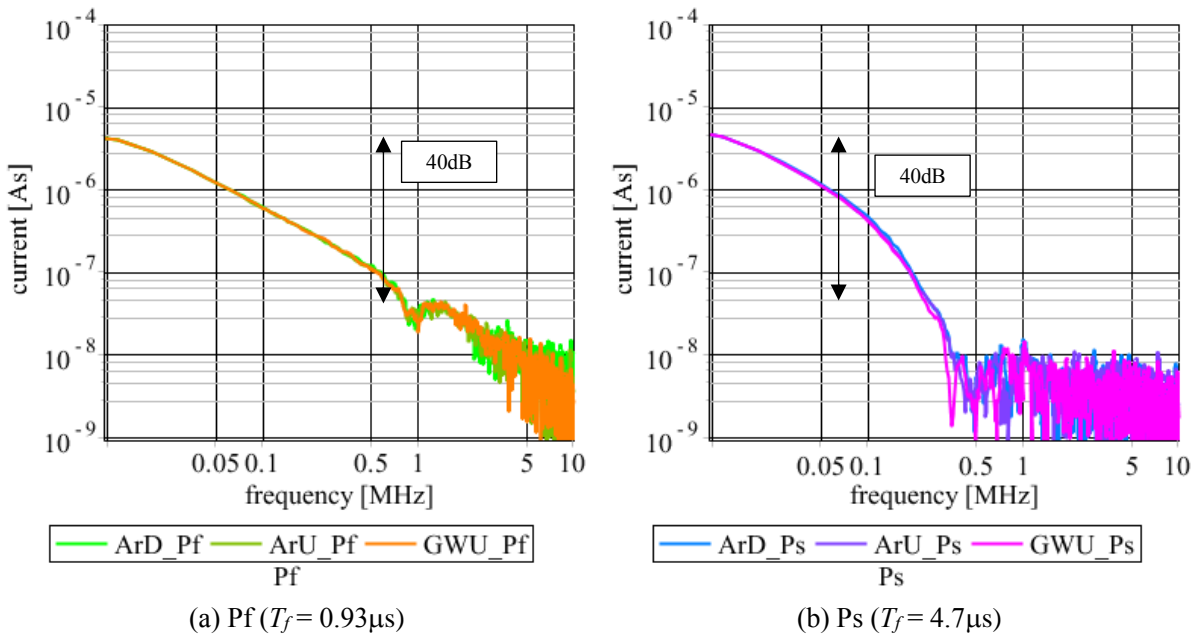


図 10.4 LLT により得られる電流の実測結果の周波数応答

図 10.5 は電圧波形を周波数変換して得られた結果である。図 10.5 (a)に示す周波数領域の電圧応答は、電源 Pf を使用した電圧の測定結果 (図 10.3) から得られ、電源 Ps を使用した時の図 10.5 (b) に示す結果と比較すると平坦な特性となる。これは、急峻な電流に対する電圧応答が、衝撃関数状となることを示している。また、それぞれの電圧応答に電流周波数応答で観測された特性と等しく 1 MHz 付近に窪みが確認される。この電圧特性は、接地システムのインピーダンスによるものではなく、電流特性と合わせて議論する必要がある。

図 10.5 (a)に示す ArD の電圧応答では、Pf を電源とした時 4 MHz 付近で極大値が観測される。これは、図 10.3 (a)に見られる振動の周波数に対応するが、この極大値は緩やかなインパルス電流 (Ps) による結果図 10.5 (b)では観測されない。これは、電流に 4 MHz 近傍の周波数成分を含まないため電圧にも観測されないが、仮にこの成分を含んだとしても、有効周波数帯域外となるため検出不可となる。

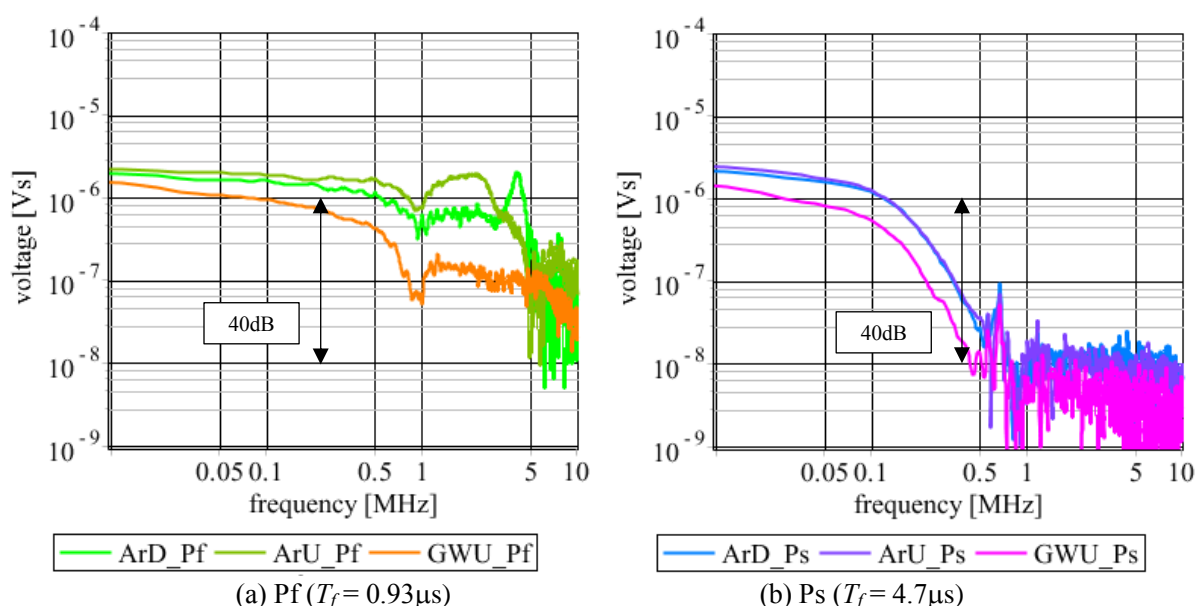


図 10.5 LLT により得られる電圧の実測結果の周波数応答.

10.4 変電所接地インピーダンス

図 10.6 は、前節で示した電圧と電流の周波数応答の比で定義する、測定によって得られた接地システムのインピーダンスを示している。10 kHz 以下の接地インピーダンスは 1Ω 以下で、10 ~ 500 kHz の周波数領域では、そのインピーダンスは周波数に概ね比例して増加する。これは、いずれの測定点における接地システムのインピーダンスも誘導性であることを示している。また、その傾きから、例えば測定点 ArD のインダクタンスは Pf と Ps で周波数 0.1 MHz においてそれぞれ $4.2 \mu\text{H}$, $4.0 \mu\text{H}$ と求められる。なお、今回測定対象とした変電所の商用周波数における接地抵抗の管理値 (測定値) は 1Ω 以下である。

図 10.6 (a)から、電流と電圧の周波数応答で観測された 1 MHz 付近の窪みは相殺または抑制され、インピーダンスには大きな影響が見られない。これにより、周波数変換によれば、電源固有の周波数特性を除外し、接地インピーダンスを得ることが可能になる。すなわち、電圧応答のみから接地インピーダンス特性を考察すると、電源の影響を含むため注意を要する。また、図 10.6 では、一

見測定インピーダンスが電流波形に依存する様に見受けられるが、前節で説明した有効周波数範囲 (f_f) を考慮すれば、電流注入点と強い相関性を持つことを示している。図 10.7 に、測定点 ArD, ArU および GWU 毎に接地インピーダンスを再掲する。図より、電源 Ps の有効周波数 f_f (0.21 MHz) 未満の周波数領域では、電源 Pf および Ps によって得られた結果は、互いによく一致していることから、十分高い精度での測定結果と考えられる。

図 10.7 (a)において、電源 Pfにより約 4 MHz, 図 10.7 (b)において約 3 MHz で観測される高インピーダンスは、有効周波数 f_f 以上であり定量的な議論は困難であるが、10.2 節で説明した図 10.3 (a), (b) に示す波頭部の振動が反共振によるものであることを表している。Ps による結果にこれが観測されないのは、前節で説明した有効周波数 f_f (0.21 MHz) より、10 倍以上高い周波数領域であるため測定の不確かさの影響を強く受けるためである。

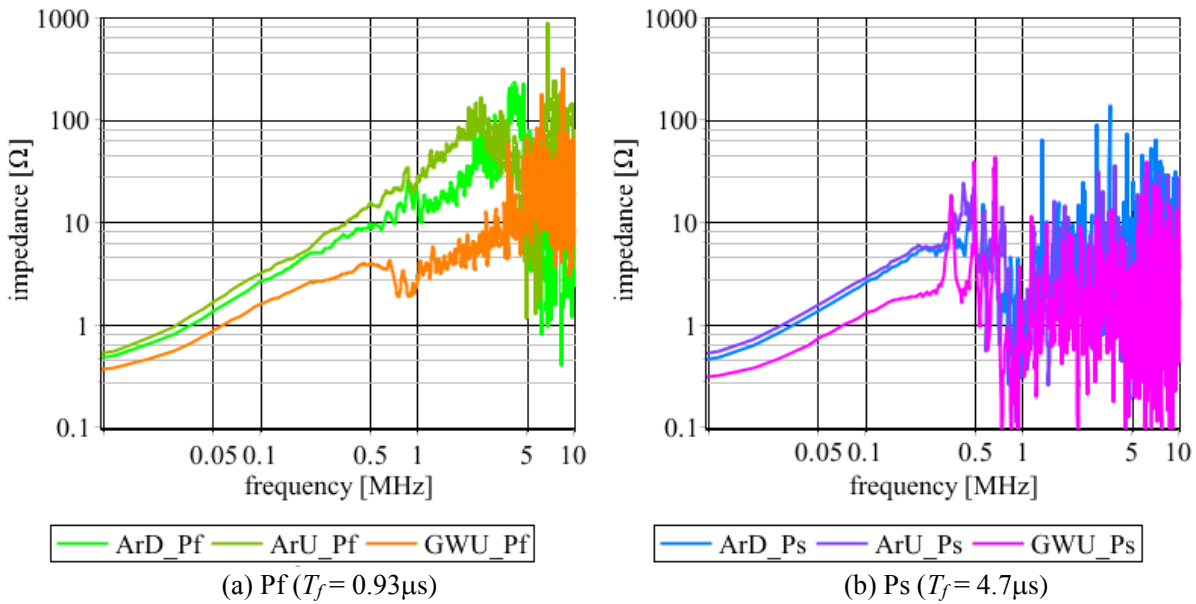


図 10.6 LLT を用いて変換した電圧と電流の比によって定義されたインピーダンス

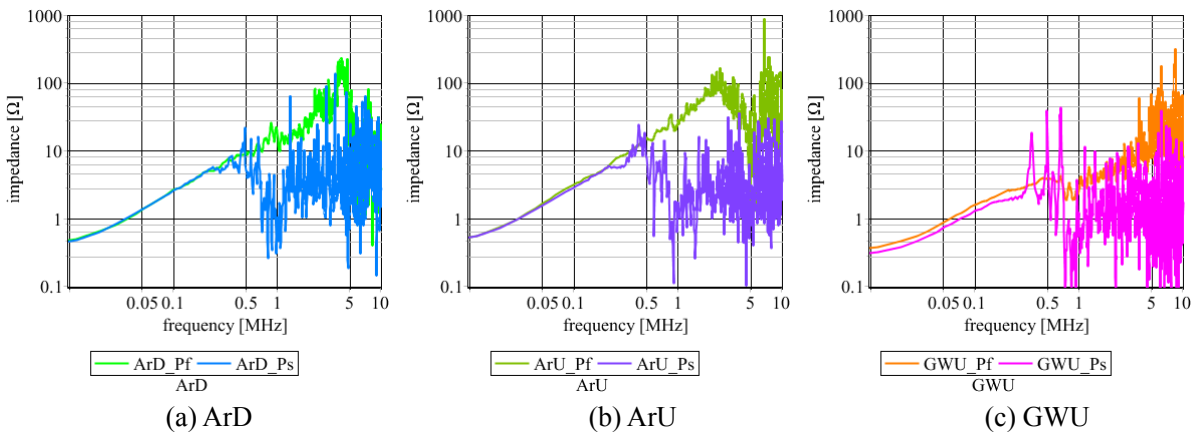


図 10.7 LLT を用いて変換した電圧と電流の比によって定義されたインピーダンス

10.5 変電所接地サージインピーダンス

本節では、周波数領域における接地システムのインピーダンスと時間領域における最大電圧と電流との比で定義されるサージインピーダンスの関係を示す。表 10.2 および図 10.8 は、図 10.4 および図 10.5 から得られる時間領域の電流と電圧の比によって得られた接地システムのサージイン

ピーダンスを示す。ここで、 Pf_1 、 Ps_1 は最大電圧とこれが観測される同時刻の電流の比を表し、 Pf_2 、 Ps_2 は電圧・電流それぞれの最大値による比で表す。周波数領域のインピーダンスは周波数 $f_f(=1/T_f)$ におけるインピーダンスの絶対値である。図 10.7 に示す周波数領域インピーダンスでは、ArU の接地インピーダンスが最大であるが、最大電圧とこの時刻における電流の比で定義するサージインピーダンス Pf_1 では、GWU の接地インピーダンスが最大となる。

サージインピーダンス Pf_2 は有効周波数 $f_f(=1/T_f)$ における周波数領域のインピーダンス Pf と $-0.6 \sim 3.2 \Omega$ の差異が観測されるものの、最大電圧観測時刻における電流で定義するサージインピーダンス Pf_1 と比して差異が小である。なお、緩波頭電流と非振動性電圧から得られた Ps_2 では、いずれも接地システム各測定点のインピーダンスの比は周波数領域のインピーダンスの比と同様の傾向を示すが、サージインピーダンスは周波数領域のインピーダンス Ps の 30%程度である。これより、時間領域のサージインピーダンスから周波数領域のインピーダンスが概ね推定できることを示している。

表 10.2 時間領域のサージインピーダンスと周波数領域のインピーダンス

	Time domain (Surge impedance)				Frequency domain	
	Pf_1 (V_{max}/I)	Pf_2 (V_{max}/I_{max})	Ps_1 (V_{max}/I)	Ps_2 (V_{max}/I_{max})	Pf	Ps
ArD [Ω]	25.0	18.1	2.3	1.4	14.9	4.8
ArU [Ω]	32.2	24.1	2.4	1.5	24.7	5.6
GWU [Ω]	38.3	5.2	0.8	0.7	3.6	2.0
$f_f=1/T_f$					1.1 MHz	0.21 MHz

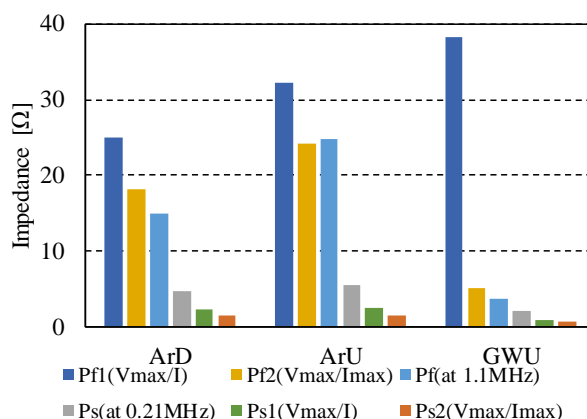


図 10.8 異なる電流源を用いた場合のサージインピーダンス

図 10.8 より、電流波頭長が長くなると、接地システムのサージインピーダンスが小となる。波頭長 T_f による影響を比較するため、 $T_f=1.8 \mu s$ 、注入電流波高値を約 50 A に設定した電源 (IG) による最大電圧と最大電流の比で定義するサージインピーダンスを加え、図 10.9 に波頭長 T_f とサー

ジインピーダンスの関係を示す。サージインピーダンスは、概ね波頭長 T_f に反比例する。これは、対象とする接地網は誘導性のインピーダンスを持つことを示す。

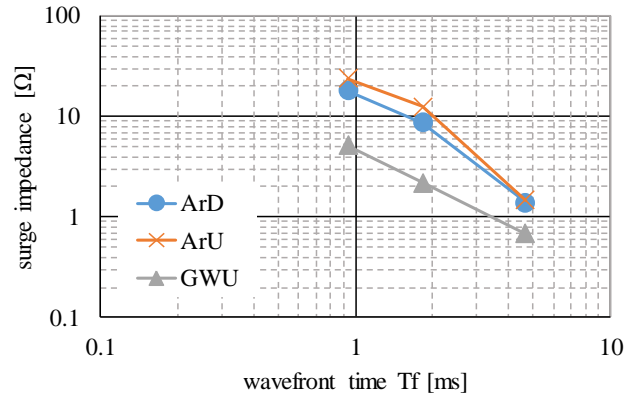


図 10.9 異なる波頭長によるサージインピーダンス

10.6 まとめ

本章では電鉄用変電所の過渡接地インピーダンスの特性をフィールド試験結果および数値ラプラス変換により求めた。これより、過渡応答評価として広く使用されている最大電圧と最大電流の比で定義される時間領域の接地システムサージインピーダンスが波頭長の逆数 $1/T_f$ で与えられる周波数における周波数領域インピーダンスがほぼ等しくなることを明らかとした。

数値ラプラス変換等、時間一周波数変換により得られた結果の有効な周波数領域は、注入電流の波頭長 T_f と過渡特性の測定には不可欠であるデジタルオシロスコープの量子化によって決定され、これらは理論で与えられるナイキスト周波数 ($1/2\Delta t$) より一般に低くなる。分解能 8bit のデジタルオシロスコープを用いた際の雷インパルスに対する有効な最大周波数は、概ね波頭長の逆数 $1/T_f$ として与えられる。これらの特性を知れば、時間一周波数変換によって得られた接地インピーダンスを的確に評価することができる。また、量子化数を増大させることは、測定精度を高めるのみならず、より広範囲な周波数特性を知るために有用であるが、雷サージなどの高速な観測においては、容易でないことが一般的である。よって、周波数帯域を広めるためには極力急峻な電流を注入して特性を測定することが望ましい。

フィールド試験時に周波数領域インピーダンスを数値計算することは困難であるが、電圧・電流測定結果最大値の比で与えられるサージインピーダンスは、測定現場で過渡特性を把握するには有用である。フィールド試験においては波頭長 T_f が $1\ \mu\text{s}$ 程度である標準雷インパルスを用いることがほとんどである。この際には $1\ \text{MHz}$ ($=1/T_f$) 程度の周波数におけるインピーダンスが得られる。

また、必ずしも時間一周波数変換を用いなくとも、異なる波頭長を有する電源によりサージインピーダンスを求めれば、概ねその接地インピーダンス特性を知ることができる。例えば、インパルス電源に直列インダクタ、あるいは並列キャパシタ等を接続して波頭を緩慢にすることは比較的容易である。

サージインピーダンスに電流最大値を乗じて雷サージ電圧を予測することがなされるが、異なる波頭長電流に対しては、必ずしも有益な手法ではない。前述の方法で誘導性接地インピーダンスであることが分かれば、波頭長に概ね反比例する電圧が発生することを推定できる。

なお、標準雷インパルスなど一定の波形を用いても、サージインピーダンスの定義が複数存在するため、上記手法によってサージ電圧を予測する場合には注意を要する。例えば電圧の最大値とその時刻における電流の比で定義されたサージインピーダンスを用いると、誘導性インピーダンスの場合、電流が遅れることにより分母が小となるため、最大電流で定義したサージインピーダンスと比して大なる値となる。これを混同して用いると過大なリスク評価となることが推定される。

11章 数値電磁界解析法と回路解析モデルの融合

11.1 はじめに

在来線直流電鉄用変電所において、耐雷設備として架空地線や避雷器が設置されているが、雷害を完全に防止することは難しく、変電設備機器が損傷する事象が発生している⁽⁵⁸⁾⁽⁵⁹⁾。そこで、避雷器近傍に発生する高電圧を低減する対策として、林屋らは避雷器等接地線の短縮および適正化、接地マットの接地抵抗低減および接地抵抗測定用電極の恒常設備化を提案している⁽³²⁾。定常接地抵抗値については Sunde をはじめとして定量的な推定法が提案⁽⁶²⁾されて広く用いられているが、雷害対策の基本となる接地系の過渡接地インピーダンスについては汎用的な定量化手法が検討されている段階にある。特に接地設計においては、事前に過渡接地特性を知る必要があり、これには数値解析が有用であるが、汎用的な計算手法が十分に確立されていない現状にある。

そこで本章では、多雷地区で発生した落雷による変電設備故障の調査結果に基づき、接地電極電位上昇に着目し、雷害対策に有効な接地系過渡現象解析に使用し得るモデリング法について検討する。電鉄用変電所接地電極は埋設地線に加え、変電所によって、その形状や辺長が様々な格子状電極を組み合わせた接地網を基本とする。したがって、実用性の高いモデルとするには、任意の電極長、形状に対応する必要がある。本章では、3次元過渡電圧、電流分布を容易に求め得る FDTD (Finite-Difference Time-Domain)法⁽⁶³⁾により得た過渡応答から、回路解析に用いる接地電極等価回路導出法を提案する。そこで、まず始めに電鉄用変電所接地系の基本となる埋設地線に雷電流が流入した場合の接地線電位分布を明らかにするために、避雷器接地線を想定した水平埋設地線を対象に FDTD 法を用いてシミュレーションを実施する。FDTD 法は接地の過渡特性を評価するには、大地の抵抗率、誘電率、透磁率を与えることで大地模擬が可能となる。しかし、FDTD 法は解析に要する計算時間が長く、大容量のメモリが必要である。また、変圧器等の電力機器や背後系統の模擬が不可能なため、接地系統と電力系統を一括して表現した雷サージの分析ができない。これに対し、EMTP は系統過渡回路解析の標準プログラムであり、大地内の電圧・電流の3次元分布を表現することはできないが、電力系統を容易に取り扱うことができる⁽⁶⁴⁾。接地系統では電磁界解析・回路解析の双方の利点を活かしたサージ解析を行うことが重要である。次にこの結果をもとに、数値計算により水平埋設地線のモデルを作成する。さらに、作成したモデルを適用した EMTP (Electromagnetic Transients Program)の計算結果と実測結果を比較することにより、提案モデルの妥当性を検証する。

11.2 電鉄用変電所雷害事例

電気鉄道設備では、これまで落雷によりさまざまな故障が発生している。ある事業者においては、1997年駅信号機器の損傷、また2000年には電鉄用変電所の特高変圧器の絶縁破壊が発生している。前者は直撃雷であり、後者は変電所が受電する電力会社の特高送電線を介して雷サージが侵入したと推定される。その後も、特高設備が損傷する事象が数回発生し、中でも整流器用変圧器 SR-Tr が損傷を受ける事象⁽²⁴⁾が多いことが特徴である。雷電流の機器への直接流入による事象もさることながら、多くは接地電位の上昇による障害である。特に、避雷器が動作したときの電流が接地系に流入し、その急峻な放電電流により接地電位が上昇したと推定される。

電鉄用変電所には、一般的に3ヵ所避雷器が設置されている。第1は、電力会社等の送電系と変電所を接続する受電側、第2は、変電所から電車に送電するき電側、さらに変電所から管内の高圧

配電設備に電力を送る高配側である。図 11.1 に一般的な電鉄用変電所の避雷器の設置位置を示す。避雷器は、各相・各回線に設置することを基本としている。受電側避雷器の設置箇所は、特別高圧架空電線路から電力の供給を受ける需要場所の引込口⁽⁶⁸⁾⁽⁶⁹⁾としているが、必ずしも設置位置、設置台数は定められていない。これは、電鉄用変電所は、一般に電力用変電所と比して用地制約が厳しいため、受電側避雷器は1箇所を設置することが一般的である。

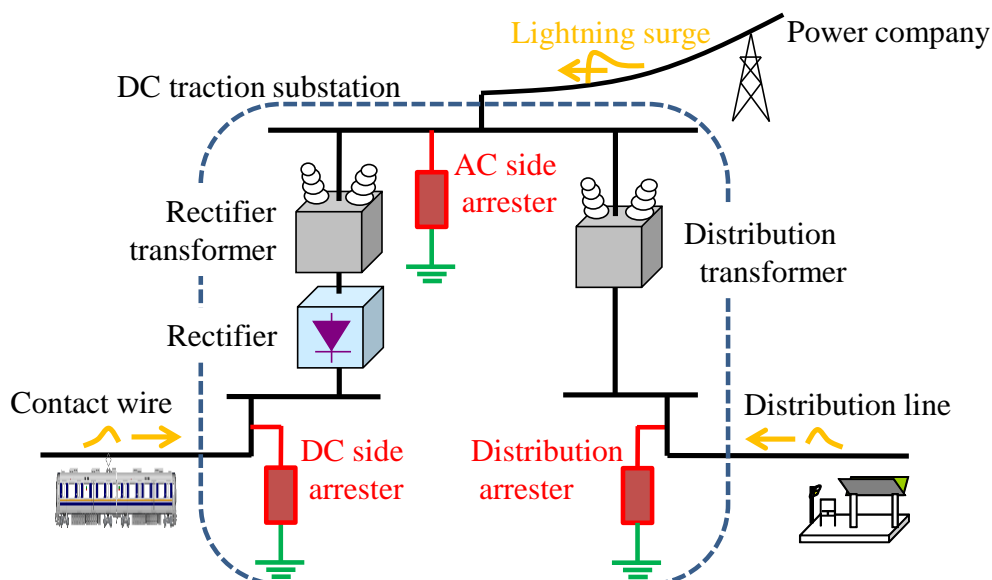


図 11.1 直流電鉄用変電所における避雷器設置位置

これらの事象を受けて、これまで定常抵抗による接地管理を実施してきたが、過渡領域における接地管理に移行しつつある。接地網の過渡電位上昇特性を実測により把握することは重要であるが、多大な労力・費用を有することもさることながら、新設設備の設計に必要な情報を得ることは困難で、接地電位上昇を数値解析により推定することが必要である。この数値解析には、3次元の電圧電流分布を考慮し得る電磁界解析法が優れているが、広大な空間を解析する必要がある電鉄用変電所接地系解析に直接適用することは難しい。そこで、本章ではまず次節に示す実電鉄用変電所における接地網過渡電位上昇を測定し、電流注入点から5m程度離隔した点において過渡電位上昇が抑制されていることを確認し、これよりモデリング法・対象を定めた。

11.3 変電所接地電位上昇実測

ここでは、電鉄用変電所への雷サージ流入時のそれぞれの変電設備架台に発生する電位分布を明らかにするために、模擬雷電流注入による接地網電位分布を測定した。検討対象である電鉄用H変電所の接地網は、4m四方を基本に硬銅より線PH 22 mm²または60 mm²にて構成されている。各変電設備架台は、接地線を用いて地表面下750 mmの位置に埋設される接地網に直接接続されている。

測定は、図 11.2 に示すように、受電用および電用避雷器の接地線に模擬雷発生装置 (PG) により1 k Ω または2 k Ω の制限抵抗を介していずれの点においても3 A程度の電流を注入し、そのときの各対象機器の接地線端子に発生する電位をデジタルオシロスコープで測定する手法を採用した。電流および電圧の基準極は、変電所接地網の端部から120 m程度離れた位置に打設した接地棒に接続している。測定箇所を図 11.3 に示す。

受電用およびき電用避雷器架台に注入した電流波形を図 11.4 に、受電 (AC) 用避雷器の R 相 (注入点 7) およびき電 (DC) 用避雷器 (注入点 14) に電流を注入した各部の最大電位分布を図 11.5 に示す。図 11.5 より電流を注入した避雷器の接地端子近傍における電位上昇が突出して高い結果であった。また、電流注入点において受電用避雷器 (注入点 7) に電流を注入した場合と比較し、き電用避雷器 (注入点 14) の電位が 2 倍程度高くなっている。これは、受電用に比べてき電用避雷器の接地線長さが 2 倍程度長いことに起因する。また、き電用避雷器に電流を注入した際、測定点 11-13 および測定点 14-17 がその他の測定箇所と比較し、高い値を示している。これは、これらの接地線と接地網の接続位置が近いと考えられる。いずれの結果からも電流注入点から 5 m 程度離れた点の過渡電圧上昇は抑制されていることが知られる。

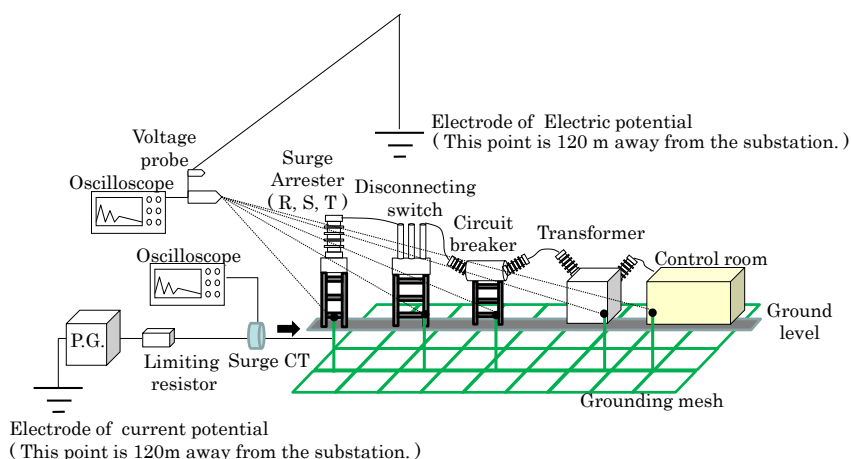
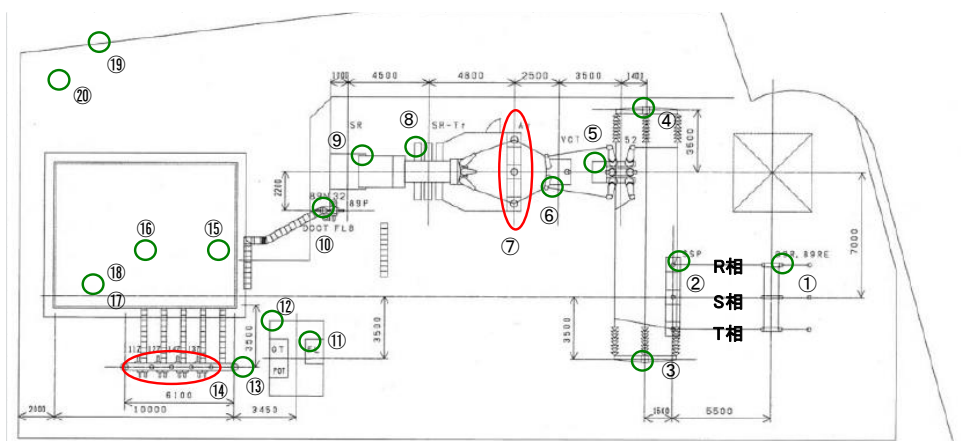


図 11.2 模擬雷電流注入による接地網電位測定回路



1	受電側断路器	11	リアクトル
2	支持架台	12	FL-OT 盤
3	鉄構 A	13	き電回路用架台
4	鉄鋼 B	14	き電用避雷器
5	交流遮断器	15	接地端子 A
6	計器用変流器	16	接地端子 B)
7	受電側避雷器	17	配電盤室 (機器接地)
8	整流器用変圧器	18	配電盤室 (遠制接地)
9	整流器	19	フェンス
10	断路器	20	接地電極

図 11.3 模擬雷電流注入による変電設備接地端子の電位測定箇所

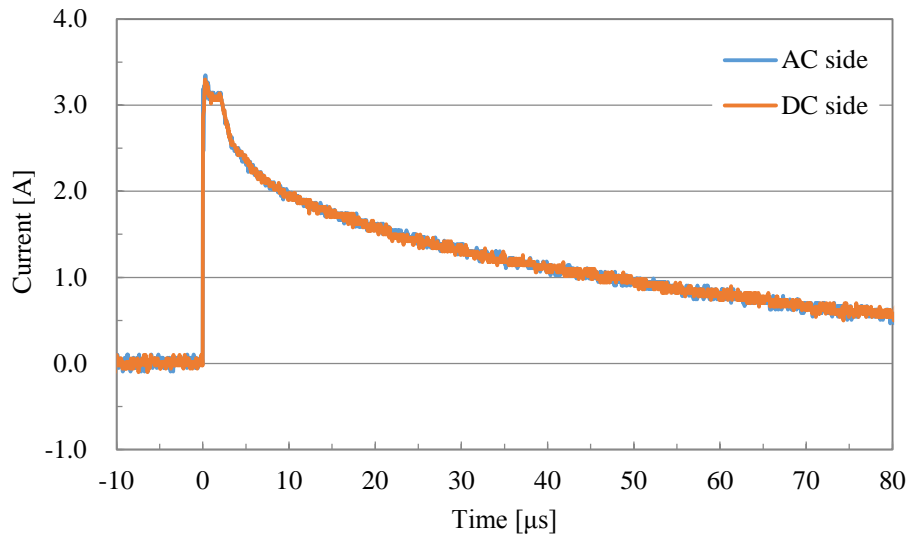


図 11.4 避雷器接地線から接地網へ注入する電流

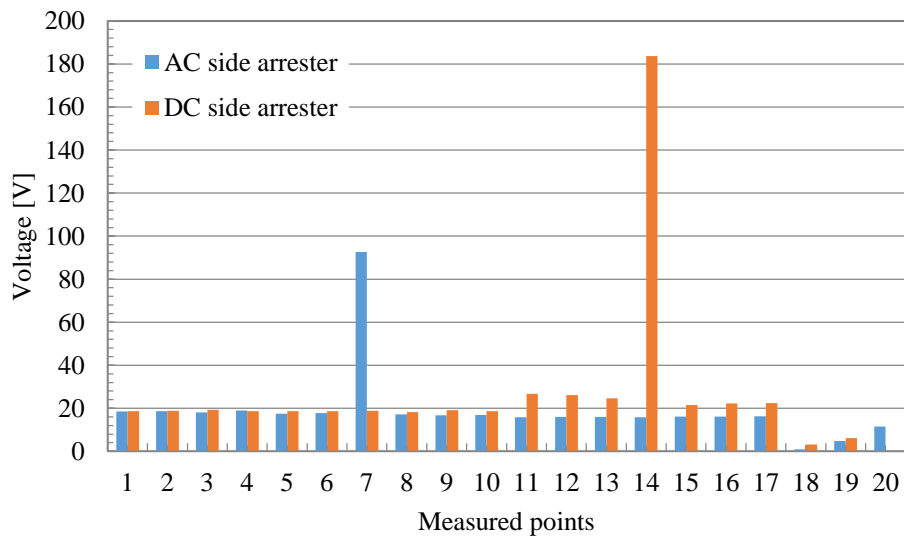


図 11.5 模擬雷電流注入による接地網電位分布
(電流印加点: No.7 and No.14)

11.4 水平埋設地線の FDTD シミュレーション

前節で示した模擬雷注入による変電設備の電位分布測定結果は、同時測定ではないがほぼ同一の電流波形を注入した場合の 20 箇所の変電設備の最大電位であり、この測定結果から対象とする電鉄用変電所接地網の電位分布が明らかとなった。しかし、定電流注入には大容量雷電流源が必要となり、測定は必ずしも容易でない。

本章では、接地系雷サージ解析手法の確立を目的として、電鉄用変電所接地系の基本要素である水平埋設地線の過渡応答を検討する。埋設地線は、在来線の変電所における前節で示した実測結果から、その長さの電位分布を十分に表現し得る 40 m とし、概ね 4 m × 4 m の格子状に構成される接地網を勘案し、4 m 毎の電位分布に着目した。

11.4.1 解析モデル

図 11.6 にシミュレーションモデルを示す。40 m の接地線を地表面下 1 m の深さに水平に埋設し、4 m 毎に電位分布を求めた。解析には電力中央研究所にて開発された汎用サージ解析プログラム VSTL (Virtual Surge Test Lab.)⁽⁷⁰⁾⁻⁽⁷³⁾を用いる。図 11.6 に示すように、160 m × 160 m × 10 m の解析空間を確保し、一辺 0.25 m (=Δ) の立方体セルで均一に分割した。埋設地線を構成する導体の等価半径は $r = 57.5 \text{ mm} (=0.23 \times \Delta)^{(70)-(75)}$ 、埋設深さは 1 m である。大地は抵抗率 $70 \text{ } \Omega\text{m}$ の一様な不完全導体とし、解析境界は Liao の 2 次吸収境界条件を適用した。最大観測時間 T_{max} は過渡電位上昇が減衰する $80 \text{ } \mu\text{s}$ とした。侵入雷サージは、これまでの実測結果⁽³²⁾と等しい振幅 71.2 A の大地表面近傍に設置した電流源で表した。この電流源の帰還線は、上面境界に接続した細線導体で表現した。なお、埋設地線電位は、底面境界から垂直方向に電界を積分し、電源から空間を伝搬する電界成分による計算誤差を極力小とした。

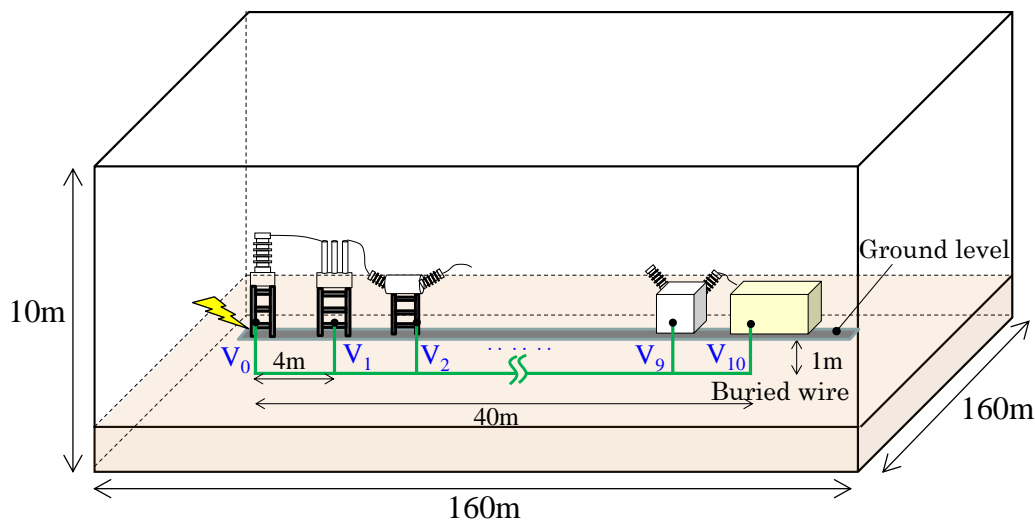
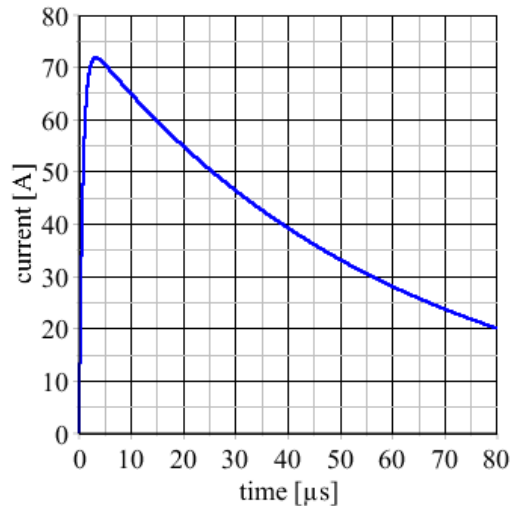


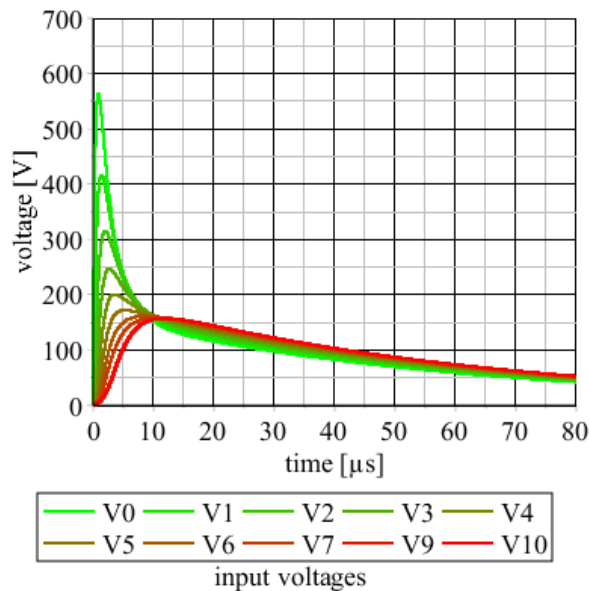
図 11.6 FDTD 法によるシミュレーションモデル

11.4.2 解析結果

埋設地線の電位分布を明らかにするために 2 重指数関数で表現される注入電流 I_m を図 11.7 (a) に、各測定点の電位波形を図 11.7 (b) に示す。図より、電流注入点直近の電位 V_0 が最も高く、注入点から 8 m 離隔すれば 50 % 程度まで電位が低下する。電流の立ち上がりと比較して電流の印加点に近いほど電圧はより急峻な波形となる。これらの特性は、埋設地線が誘導性を持つことを表す。埋設地線の間差点に位置する V_5 、 V_6 の電圧波形は、ほぼ電流波形と相似となり抵抗性となる。 $V_7 \sim V_{10}$ の電圧波形は立ち上がりがゆるやかとなり容量性の特徴が確認される。



(a) 注入電流



(b) 電位分布

図 11.7 埋設接地線の電位分布

なお、これらの特性は周波数領域で考察することにより、明確となる。本章では 7.9 節で述べた直線近似ラプラス変換 LLT を用いる。

図 11.8 に、LLT によって得られた各ノード電圧の周波数特性を示す。図より、埋設地線各部の電圧波形の特徴はこの周波数応答からも確認されるが、この特徴を把握することは容易ではない。埋設地線の過渡特性を把握するためには、電圧の周波数応答と電流の比から算出するインピーダンスで評価することが有効である。

図 11.9 に各点の電圧周波数特性を注入電流周波数特性で除したインピーダンスを示す。低周波領域における自己インピーダンスすなわち印加電圧（端子 0）と注入電流の比は 4.1Ω でその位相は正となり誘導性であり、抵抗性である端子 5, 6 の相互インピーダンスは、 2.5Ω 程度で、位相はほぼ零である。中間点以降の相互インピーダンスは、位相が負となり容量性を示す。なお、図 11.9 (b) に示す位相特性が高周波領域で振動を示すが、これは位相の回転を示し、伝搬時間おくれ、すな

わち進行波の伝搬時間を表す。本章では、この特性を利用して埋設地線の線路モデルを次節で構築する。

図 11.7 (b), 図 11.9 に示す結果から、埋設地線に雷電流が流入する場合、電流印加点から 20m 未満の機器は、誘導性インピーダンスにより定常電圧より過渡的に接地電位が上昇し、雷被害を受ける可能性が高まると想定される。従って、雷電流の流入が想定される点近傍には機器を設置すべきではないが、都市部における電鉄用変電所では用地確保が難しいため、雷サージ防護を目的に機器を離隔することは難しい。接地システムの設計では、この埋設地線の特徴に十分配慮し、過渡インピーダンスが誘導性となる場合は、埋設地線を追加あるいは網状接地電極とする必要がある。

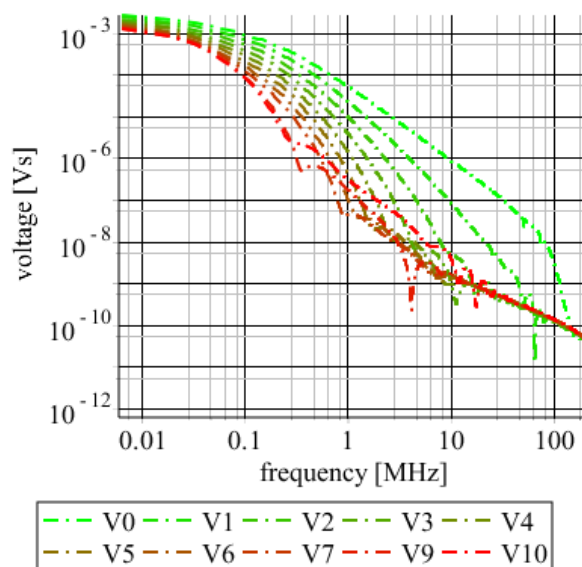


図 11.8 埋設接地線電位の周波数特性

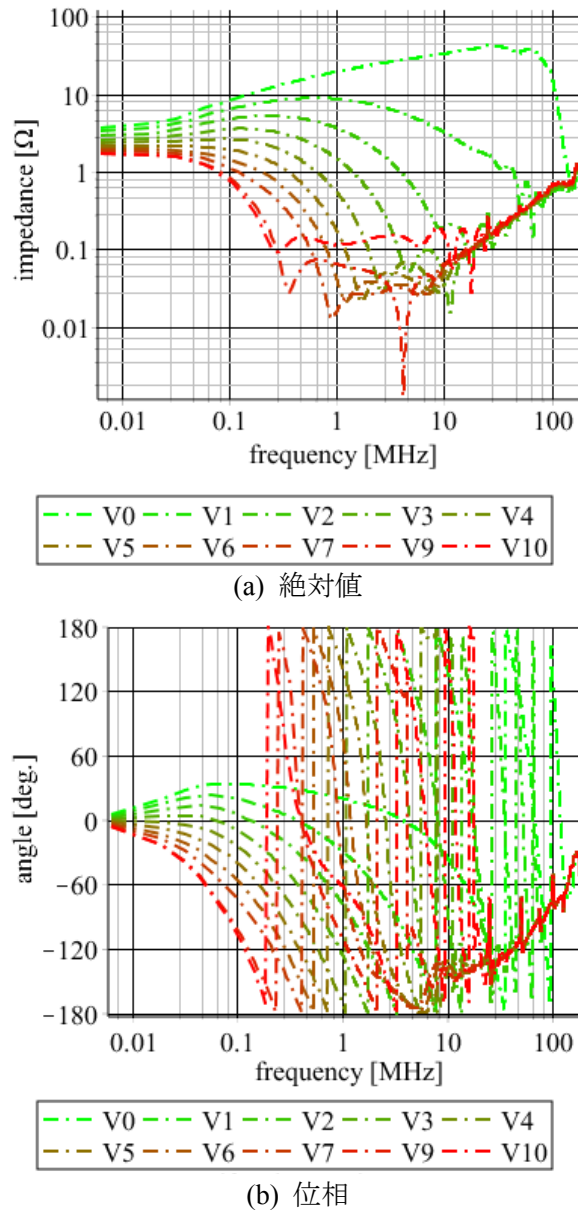


図 11.9 埋設地線自己および相互インピーダンスの周波数特性

11.5 水平埋設地線の EMTP シミュレーション

本章では、接地設計に用いる過渡特性把握のため、回路解析法を採用している EMTP を用いた埋設地線の過渡応答のシミュレーションについて説明する。回路解析法では、対象回路の特性を表現するモデルが必要となるが、埋設地線表現する汎用的なモデルは提案されていない。しかしながら、前章の計算結果から、埋設地線上の電圧は電流注入点から離隔するに伴い電圧の上昇時刻が遅れ、一様に特性が変化することから、周波数依存分布定数線路で表現できると考えられる。線路の定数を得るには、実測結果から推定することも一案であるが、接地線特性を設計時に実測により得ることは一般に困難である。そこで、接地線特性に重要である 3 次元電圧、電流分布を考慮して数値電磁界解析法により埋設地線の過渡応答を求め、これより回路解析に用いる線路モデルを構築すれば、汎用的な回路解析用接地線モデルが得られる。電磁界解析法のひとつである FDTD 法により先に求めた注入電流 I_0 に対する送・終端の電圧 V_0 , V_{10} を、数値ラプラス変換を用いて周波数領域

に変換する。このとき、埋設地線の端部は開放端となるため、終端電流 I_{10} は零である。この関係は、周波数領域において分布定数線路の4端子 Y パラメータを用いて次式で表される⁽⁴⁹⁾⁽⁷⁶⁾。

$$\begin{pmatrix} I_0 \\ I_{10} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Y_0 \coth(\Gamma l) & -Y_0 \operatorname{csch}(\Gamma l) \\ -Y_0 \operatorname{csch}(\Gamma l) & Y_0 \coth(\Gamma l) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_0 \\ V_{10} \end{pmatrix} \quad (11.1)$$

(11.1)式において、 Y_0 は特性アドミタンス、 Γ は伝搬定数で各電圧・電流と共に周波数の関数である。特性アドミタンス Y_0 および進行波の伝搬遅れおよび変歪を表す波形伝搬特性 $\exp(-\Gamma l)$ の単位関数応答を指数関数で近似すれば、9章で説明したレールモデルと同様再帰コンボリューション線路モデル(Semlyen's line model)⁽⁵⁶⁾により埋設地線の周波数依存分布定数線路モデルが得られる。(11.1)式を特性アドミタンス Y_0 、進行波波形伝搬特性 $\exp(-\Gamma l)$ について解き、これらの応答を数値逆ラプラス変換によって算出する。まず、(11.1)式のうち終端電流 I_{10} に関する関係式より、以下のように送端、終端電圧比と波形伝搬特性の関係が得られる。

$$\frac{\operatorname{csch}(\Gamma l)}{\coth(\Gamma l)} = \frac{2}{\exp(\Gamma l) + \exp(-\Gamma l)} = \frac{2 \exp(-\Gamma l)}{1 + \exp(-2\Gamma l)} = \frac{V_{10}}{V_0} \quad (11.2)$$

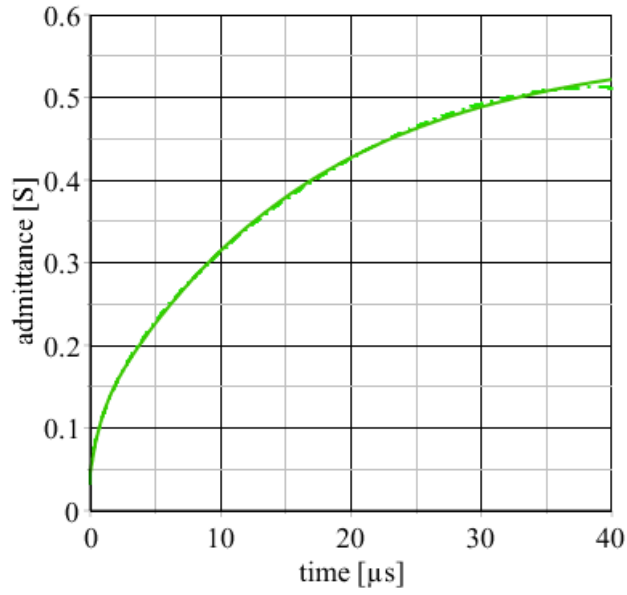
これは、波形伝搬特性 $\exp(-\Gamma l)$ に関する2次方程式を表すので、これを解く。

$$\exp(-\Gamma l) = \left(V_0 \pm \sqrt{V_0^2 - V_{10}^2} \right) / V_{10} \quad (11.3)$$

上式の正符号 (+) は逆進波 $\exp(\Gamma l)$ を表すので、負号を採用する。(11.1)式のうち送端電流 I_0 に関する関係式に(11.3)式を代入することより、特性アドミタンスを得る。

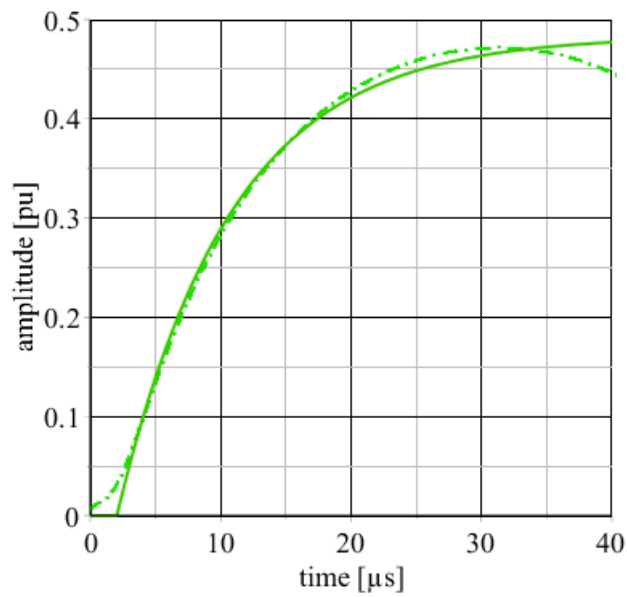
$$\begin{aligned} Y_0 &= \frac{I_0}{\coth(\Gamma l) V_0 - \operatorname{csch}(\Gamma l) V_{10}} = \frac{\sinh(\Gamma l)}{\cosh(\Gamma l) V_0 - V_{10}} I_0 \\ &= \frac{1 - \exp(-2\Gamma l)}{(1 + \exp(-2\Gamma l)) V_0 - 2 \exp(-\Gamma l) V_{10}} I_0 = \frac{1}{\sqrt{V_0^2 - V_{10}^2}} I_0 \end{aligned} \quad (11.4)$$

図 11.10 に鎖線で特性アドミタンス Y_0 、波形伝搬特性 $\exp(-\Gamma l)$ の単位関数応答計算結果を示す。図 11.10 (a)に示す特性アドミタンス単位関数応答は、時間の経過に伴い上昇し誘導性を示すことが知られる。これは架空線、ケーブルなど一般的な分布定数線路である容量性とは異なるが、接地線では線路漏洩コンダクタンス G が存在するためである。また、図 11.10 (b)に示す波形変歪単位関数応答は時間の経過に伴い上昇するが、線路コンダクタンス G の影響によりその収束値は1未満となる。いずれの応答も指数関数で近似可能でその結果を図 11.10 実線で示す。



Y₀ step response

(a) Y₀



wave deformation step response

(b) $\exp(-\Gamma l)$

図 11.10 線路定数のステップ応答

本章では特性アドミタンスの単位関数応答 $y_0(t)$ は次式に示す指数関数 2 項，単位関数変歪応答 $d_f(t)$ は 1 項で表現したが，接地設計に十分な精度で近似がなされている。

$$y_0(t) = k_{y0} + k_{y1} \exp(-p_{y1}t) + k_{y2} \exp(-p_{y2}t) \quad (11.5)$$

$$d_f(t) = \left\{ k_{d0} + k_{d1} \exp(-p_{y1}(t-\tau)) \right\} u(t-\tau) \quad (11.6)$$

指数関数で近似した各応答の係数 (k, p) は、EMTP の有する周波数依存再帰コンボリューション線路モデル(Semlyen's line model)の係数と対応するため、そのまま EMTP 回路解析に用いることができる。図 11.11 に本モデルを適用した電流注入点と終端の電圧計算結果を示す。図 11.7 に示す FDTD 解析結果との比較より、提案モデルは、注入点における誘導性、終端における容量性インピーダンスを共に良好に表現しており、接地設計において要求される解析精度を満足する精度を有する。

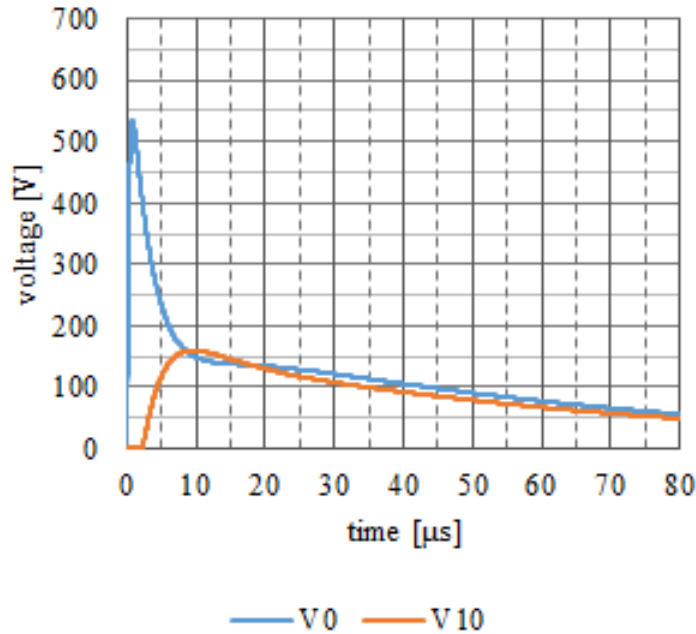


図 11.11 Semlyen 線路モデルを用いたシミュレーション結果

なお、埋設地線途中点の電位を求める際には、線路を分割して表現する必要があるが、先に求めた分割前の Semlyen 線路定数から直接分割線路定数を得ることはできない。そこで、任意互長に対する線路定数が容易に得られる π 型等価回路で埋設地線を表現する。なお、線路を多段に分割すれば集中定数回路で表現してもその近似誤差は小である。単位長当たりの線路直列インピーダンス Z と並列アドミタンス Y は次式で計算される。

$$\begin{aligned} Z &= R + j\omega L = \sqrt{ZY} \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \frac{\Gamma}{Y_0} \\ Y &= G + j\omega C = \sqrt{ZY} \sqrt{\frac{Y}{Z}} = \Gamma Y_0 \end{aligned} \quad (11.7)$$

先に求めた特性アドミタンス Y_0 、伝搬定数 Γ は周波数の関数となるため、線路抵抗 R 、インダクタンス L 、コンダクタンス G 、キャパシタンス C は共に周波数の関数であるが、ここではある周波数における線路定数で表現する。この定数算出周波数 f は、一般に対象とする回路の線路に流れる電流あるいは電圧の主振動周波数で定める。線路過渡現象計算では伝搬時間を τ として $f=1/4\tau$ として、進行波往復反射特性を精度よく表現することが一般であるが、埋設地線では往復反射が観測されないことから、これより低い周波数で定めればよい。本章では、前章の解析結果により得られた

埋設地線伝搬時間 τ が $1.7 \mu\text{s}$ であること、および回路が埋設地線のみからなることから、 $1/4\tau$ より小となる 100 kHz とした。解析対象回路により振動性の波形が推測される場合は、その基本振動周波数で定めればよい。埋設地線を 10 分割し、(11.7)式より得られる単位長当たりの線路定数に区間長を乗じた回路定数により構築した π 型等価回路より計算した EMTP によるシミュレーション結果を図 11.12 に示す。

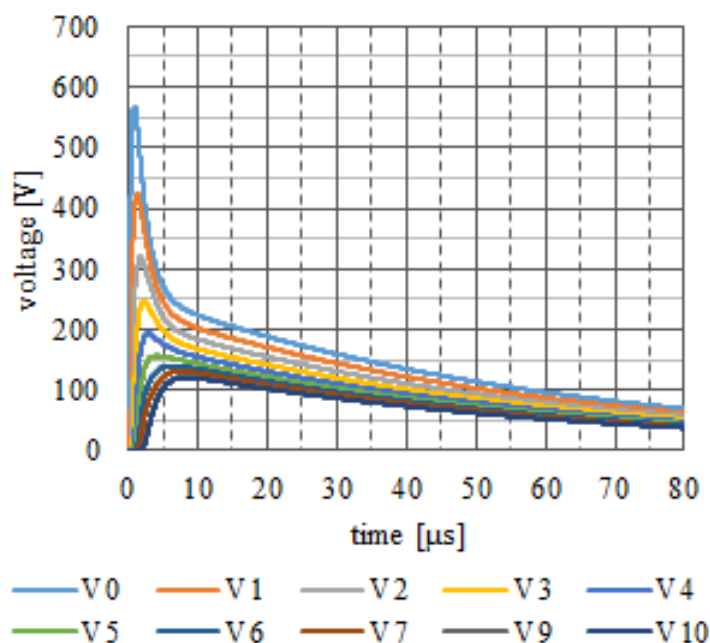


図 11.12 π 型等価回路を用いたシミュレーション結果

図より、線路を集中定数回路模擬したこと、周波数依存性を無視したこと等により、図 11.12 に示す再帰コンポリューション線路モデルと比して若干の差異は観測される。しかしながら、図 11.7 に示す FDTD 解析結果と比して、送端部で誘導性、中央部で抵抗性、終端部で容量性を示す特性を再現しており、最大電圧の差異は 5%程度で、接地設計に対しては実用精度を有している。また、埋設地線の任意点での電圧も容易に解析し得ることより、電鉄用変電所の接地設計に極めて有用なモデルである。

11.6 まとめ

本章では、まず始めに電流源を用いて模擬雷電流を電鉄用変電所接地網に印加することによって接地系電位分布を測定した。これより、接地網の過渡電圧上昇は電流注入点から概ね 5 m 以内で観測され、この範囲の変電所接地系を詳細に模擬する必要があることを明らかとした。

次に、電鉄用変電所新設時など接地系の設計に必要となる埋設地線の数値解析モデルを構築する手法を提案した。埋設地線の過渡特性を表現する理論モデリング法は十分に確立されておらず、実験によりその特性を把握する必要があったが、近年は 3 次元電圧電流分布特性が電磁界解析法により精度よくシミュレーション可能となっている。本章では、FDTD 法を用いて埋設地線接地特性を求め、これより回路解析に用いる埋設地線モデルを構築した。提案法によれば、大地抵抗率などの条件が異なる際にも回路モデルを導出でき有用である。

提案回路モデルは、分布定数線路で表現され、その等価線路定数は FDTD 法による計算結果から算出された埋設地線の電圧および注入電流波形を周波数領域に変換し、等価な特性アドミタンスと伝搬定数を周波数領域で得る。これから特性アドミタンスと進行波波形伝搬特性の単位関数応答を求め指数関数近似する。この近似結果を EMTP の有する再帰コンボリューション(Semlyen)線路モデルで表現する。このモデルは遠方接地線など比較的長い埋設地線の特性を効率的に表現することができる。また、埋設地線上の多数点の電圧を求める必要がある場合には、先に求めた特性アドミタンスと伝搬定数から、線路直列インピーダンス、並列アドミタンスを求め、これより合成した π 型等価回路により埋設地線を表現すればよい。これにより、電鉄用変電所接地系の各点電圧、すなわち変電所各機器の接地電位上昇を求めることができる。いずれのモデルにおいても、ひとたびモデル定数を得た後は、計算時間を要する FDTD 解析は不要で、雷サージ電流波形など計算条件を変更する場合には、高速な回路解析のみによって解を得ることができる。

提案手法は、FDTD 解析を用いることによって、土中の3次元電流分布を考慮した回路解析(EMTP シミュレーション)を可能にする。提案する等価回路導出と回路解析法は、電鉄用変電所における電力および信号設備の雷被害を含むサージ防護および設計において、有用な知見を与えられられる。

本研究成果を応用すれば、埋設地線を組み合わせた変電所接地網における過渡接地電圧上昇を推定し得る。さらに FDTD 法など電磁界解析のみでは解析が不可能であった大規模回路、あるいは変圧器など大型機器とケーブルなどの小型機器が混在する回路を回路解析法により計算できる。

12章 結言

本論文は、鉄道の安全・安定輸送を確保するため電気設備の雷害を防止することを目的とし、実測およびシミュレーション技術を導入することにより検討した。

まず初めに第2章において、き電システムの概要を述べ、直流および交流き電回路について概説した。次に第3章では、実フィールドで発生している雷害事例について具体的事例を紹介した。

第4章では、変電所接地網等大規模接地に対する接地抵抗測定について、標準法ではあるが大規模な装置を要する電圧降下法を補完し、接地系の保守に有用な簡易接地抵抗計を使用した手法を提案した。簡易法であっても、接地極を移動させ数回測定することにより、信頼性の高い接地抵抗値を得られることを現地試験により確認した。また、変電所接地網のインピーダンスの周波数特性を測定し、低周波領域ではほぼ一定であるが、5 kHz以上の高周波領域では概ね周波数に比例して上昇し、雷サージに対しては従来の低周波に対する接地抵抗の管理では不十分であることを示した。

第5章では、在来線直流電鉄用変電所における模擬雷注入によるサージインピーダンス測定及び電位分布測定から、変電所接地網の接地特性を明らかとした。サージインピーダンスは、き電側60 Ω、受電側90 Ω程度となり、避雷器接地線長さの増加に伴いサージインピーダンスが上昇することを示している。従って雷害低減には接地極のインピーダンス低減もさることながら接地網への接続線長を極力短くするなど配線にも十分注意を払う必要がある。また、メッシュ接地と遠制接地は過渡及び定常的に波形様相が異なることをフィールド試験から明らかとし、雷電流の侵入がない信号制御系の接地は遠制接地とすることで雷害を低減し得ることを明らかとした。

第6章では、制御ケーブルに誘導電圧を発生させる雷サージに焦点をあて、電鉄用変電所の過渡応答でのフィールド試験結果から、制御ケーブルに発生する電圧は、電子回路を損傷させるに十分高いことを示している。この対策として、制御ケーブルの空き線を接地して制御ケーブルに発生する誘導電圧を効果的に低減し得ることを示した。具体的な施工として、空き線の配電盤側または両端接地は有効であるが、機器側のみの片端接地は制御ケーブルに高電圧が発生する可能性があるため実施すべきではないことを明らかとした。

第7章では、電鉄用変電所の整流器用変圧器SR-Tr損傷に着目し、EMTPのシミュレーション解析結果を示した。解析結果から雷電流の大きさや雷撃位置を想定すれば発生する雷サージの推定が可能となり、電気鉄道の電力システム設計に数値解析が極めて有用であることが明らかとした。また変電所を構成する変電設備機器との共振現象により機器が損傷する可能性があり、想定雷電流の周波数成分すなわち波形については十分注意を払う必要がある。

第8章では、軌道回路に設置されたインピーダンスボンドの障害に着目し、その原因について検討を加えた。まず、インピーダンスボンドのサージ応答特性を表現し得るモデルを定常インピーダンス測定法により構築し、その精度を過渡応答試験とシミュレーション結果との比較により検証した。その結果、レールを流れた雷電流がインピーダンスボンドに流入する際の雷サージは、本章で開発したインピーダンスボンドモデルを適用したEMTP解析により推定することができ、閉そく区間内に存在する列車の在線検知の感度を共振により向上させる共振キャパシタの焼損の原因はキャパシタの耐電圧不足ではなく、これに流れる雷電流によるものであることを明らかとした。さらに、EMTPは電力系統の過渡現象解析ツールとして開発されているが、系統解析と同様に軌道回路の雷サージ解析を行う効果的なツールであることも明らかとした。

第9章では、鉄道用レールを等価均質線路で表現し、まくらぎやバラストによるレール波形伝搬特性の変化を線路並列アドミタンスの増加分として表現することで均質線路理論を適用し、またこのアドミタンスを実験的に求める手法を提案した。次にレールの等価半径、等価高より線路直列インピーダンスを導出する近似式を導出している。次にラプラス演算子 s で表現された線路定数に Pade 近似を適用することで解析的に EMTP Semlyen 線路モデルに必要な定数を導出し、本論文で示した回路モデルの精度はフィールド試験結果と良好に一致することを確認した。以上から、第8章と同様に、EMTP を提案レールモデルにより鉄道信号設備に生ずる高精度サージ解析に応用可能とした。

第10章では、電鉄用変電所の過渡接地インピーダンスの特性をフィールド試験結果および数値ラプラス変換により求めた。これより、過渡応答評価として広く使用されている最大電圧と最大電流の比で定義される時間領域の接地システムサージインピーダンスが波頭長の逆数で与えられる周波数における周波数領域インピーダンスとほぼ等しくなることを明らかとした。また、雷インパルスに対する有効な最大周波数は、概ね波頭長の逆数として与えられ、時間・周波数変換によって得られた接地インピーダンスを的確に評価できることを示している。また、測定時の量子化数を増大させることは、測定精度を高めるのみならず、より広範囲な周波数特性を知るために有用であるが、雷サージなどの高速な観測においては容易でない。よって、周波数帯域を広めるためには極力急峻な電流を注入して特性を測定することが望ましい。実際のフィールド試験時に周波数領域インピーダンスを数値計算することは困難であるが、電圧・電流測定結果最大値の比で与えられるサージインピーダンスは、測定現場で過渡特性を把握するには有用であり、必ずしも時間・周波数変換を用いなくとも、インパルス電源に直列インダクタ、あるいは並列キャパシタ等を接続して波頭を緩慢にすることにより異なる波頭長を有する電源によりサージインピーダンスを求めれば、概ねその接地インピーダンス特性を知ることが可能となる。さらに、サージインピーダンスに電流最大値を乗じて雷サージ電圧を予測することがなされるが、異なる波頭長電流に対しては、必ずしも有益な手法ではない。前述の方法で誘導性接地インピーダンスであることが分かれば、波頭長に概ね反比例する電圧が発生することを推定できる。なお、標準雷インパルスなど一定の波形を用いても、サージインピーダンスの定義が複数存在するため、上記手法によってサージ電圧を予測する場合には注意を要する。例えば電圧の最大値とその時刻における電流の比で定義されたサージインピーダンスを用いると、誘導性インピーダンスの場合、電流が遅れることにより、最大電流で定義したサージインピーダンスと比して大なる値となる。これを混同して用いると過大なリスク評価となるので注意を要する。

第11章では、まず始めに電流源を用いて模擬雷電流を電鉄用変電所接地網に注入することによって接地系電位分布を測定した。これより、接地網の過渡電圧上昇は電流注入点から概ね5m以内で観測され、この範囲の変電所接地系を詳細に模擬する必要があることを明らかとした。次に、電鉄用変電所新設時など接地系の設計に必要な埋設地線の数値解析モデルを構築する手法を提案した。埋設地線の過渡特性を表現する理論モデリング法は十分に確立されておらず、実験によりその特性を把握する必要があったが、近年は3次元電圧電流分布特性が電磁界解析法により精度よくシミュレーション可能となっている。本章では、FDTD法を用いて埋設地線接地特性を求め、これより回路解析に用いる埋設地線モデルを構築した。提案法によれば、大地抵抗率などの条件が異

なる際にも回路モデルを導出でき有用である。提案回路モデルは分布定数線路で表現され、その等価線路定数は FDTD 法による計算結果から算出された埋設地線の電圧および注入電流波形を周波数領域に変換し、等価な特性アドミタンスと伝搬定数を周波数領域で得る。これから特性アドミタンスと進行波波形伝搬特性の単位関数応答を求め指数関数近似した結果を EMTP の有する再帰コンポーネーション(Semlyen)線路モデルで表現する。このモデルは遠方接地線など比較的長い埋設地線の特性を効率的に表現することができる。また、埋設地線上の多数点の電圧を求める必要がある場合には、先に求めた特性アドミタンスと伝搬定数から、線路直列インピーダンス、並列アドミタンスを求め、これより合成した π 型等価回路により埋設地線を表現すればよい。これにより、電鉄用変電所接地系の各点電圧、すなわち変電所各機器の接地電位上昇を求めることができる。いずれのモデルにおいても、ひとたびモデル定数を得た後は、計算時間を要する FDTD 解析は不要で、雷サージ電流波形など計算条件を変更する場合においては、高速な回路解析のみによって解を得ることができる。提案手法は、FDTD 解析を用いることによって、土中の 3 次元電流分布を考慮した回路解析 (EMTP シミュレーション) を可能にする。提案する等価回路導出と回路解析法は、電鉄用変電所における電力および信号設備の雷被害を含むサージ防護および設計において、有用な知見を与えると考えられる。

以上から、本研究成果を応用すれば、埋設地線を組み合わせた変電所接地網における過渡接地電圧上昇を推定し得る。さらに FDTD 法など電磁界解析のみでは解析が不可能であった大規模回路、あるいは変圧器など大型機器とケーブルなどの小型機器が混在する回路を回路解析法により計算を可能にした。この成果は電気鉄道電気設備の設計や過渡現象解析に極めて有用であり、電力系統などその他分野への応用可能である。

シミュレーション技術は、設備が現存しない場合であっても多種多様な検討を事前に行い、詳細検討を可能にする。これは現在急速に拡大している鉄道インフラの海外輸出に大なる貢献をし得ると考えられる。これらの技術も含め既設設備の解析結果に加え、将来考えられる設備構築に向けて本研究成果を実用化していく所存である。この技術を国内はもちろん、現在国策としても取り組んでいる鉄道の海外展開にも繋げていきたい。

13章 参考文献

- (1) 社団法人日本鉄道電気技術協会：「鉄道電気技術者のための電力概論 き電・変電シリーズ3」, (2009)
- (2) 電気書院：「JEC-2410-2010 半導体電力変換装置」, (2011)
- (3) 社団法人日本鉄道電気技術協会：「鉄道電気技術者のための信号概論 軌道回路」, (2008)
- (4) Takahiro Nakashima, Kazuo Yamamoto, Shinichi Sumi: “Transition of the Number of Annual Lightning Days in Japan”, 2015 Asia-Pacific International Conference on Lightning(APL), PS1-1 (2015)
- (5) 社団法人日本鉄道電気技術協会：「鉄道電気設備の耐雷害性の向上に関する調査報告書」, (2010)
- (6) 音羽電機工業株式会社：「第7回雷と雷保護技術セミナー in 大阪 亜熱帯化する日本の雷対策」, 2016
- (7) 安田陽・末永大周：「修理コストと停止時間の相関に着目した風車雷事故統計分析」, 高電圧研究会, HV-16-37, pp.95-100 (2016)
- (8) 西日本旅客鉄道：「リスクアセスメント・ハンドブック」, P20 (2014)
- (9) 一般社団法人日本鉄道電気技術協会：「解析 鉄道に関する技術基準（電気編）第三版」, pp. 238-239 (2014)
- (10) 経済産業省：「電気設備の技術基準の解釈 改正20160418 商局第7号 平成28年5月25日付け」, 第37条 (2016)
- (11) 一般社団法人日本電気協会：「発変電規程」 JEAC 5001-2012, (2012)
- (12) 社団法人日本鉄道電気技術協会：「鉄道電気技術者のための信号概論 軌道回路」, (2008)
- (13) Shigeru Ambo, Hitoshi Hayashiya, Shingo Katano, Makoto Itagaki, Hiroyoshi Itoh, Toshitaka Shimizu, Kenichi Yamamoto, Masashi Murakoshi: “Influence of measurement electrodes location in simplified grounding resistance measurement at MICHIKAWA Sub-Sectioning Post”, 2015 Asia-Pacific International Conference on Lightning(APL), TC6.2-4 (2015)
- (14) Ryosuke Ooagu, Yu Okubo, Hitoshi Hayashiya, Takehiko Nakamura, Hiroaki Takei, Yusuke Iwai, Takahiro Nomura, Hiromoto Ogasawara, Masaaki Tago: “Study of grounding resistance of electrical and electric equipment around railway premises”, 2015 Asia-Pacific International Conference on Lightning(APL), TC6.2-6 (2015)
- (15) 川瀬太郎・高橋健彦：「図解 接地技術入門」, pp. 55 (2008)
- (16) 本山英器：「接地網の雷サージ特性に関する実験的・解析的検討」, 電学論 B, 126 巻 7 号, pp.687-693 (2006)
- (17) 立松明芳・山崎健一・宮島清富・本山英器：「接地網の雷サージ特性に関する実験的・解析的検討」, 電中研報告, H08017 (2009)
- (18) 本山英器：「各種接地電極の過渡接地抵抗特性の実験的検討」, 電中研報告, H04010 (2005)
- (19) 本山英器・野田琢：「埋設地線の雷サージ特性に関する実験的検討」, 電中研報告, T00062 (2001)
- (20) 植田俊明・竹内伸貴・杉本俊郎・佐藤達則・船橋俊久・宮城克徳：「周波数特性を考慮した変圧器移行電圧モデルの検討」, 電学論 B, 117 巻 9 号, pp.1294-1300 (1997)
- (21) 植田俊明・根尾定紀・杉本俊郎・船橋俊久・竹内伸貴：「変圧器移行電圧の測定と解析モデルに関する検討」, 電学論 B, 115 巻 12 号, pp.1494-1500 (1995)
- (22) 植田俊明・森田政夫・山極時生・管雅弘・緒川貴伸：「77kV 変電所侵入雷サージの測定」, 電学論 B, 114 巻 1 号, pp.45-52 (1994)
- (23) 植田俊明・大橋義雄：「変電所へ侵入する雷サージの実測」, 電学論 B, 113 巻 9 号, pp.977-980 (1993)
- (24) 田中弘毅・杉山祐介・細口祐樹・川原敬治・林謙治・長岡直人：「電鉄用変電所雷サージ過電圧低減に関する EMTP 解析」, 平成 27 年電気学会産業応用部門大会, 5-13, pp.171-174 (2015)
- (25) 田中弘毅・伊東和彦・川原敬治・長岡直人：「電鉄用変電所接地網の雷サージ特性に関する数値解析による検討」, J-rail2014, pp.158-161 (2014)
- (26) 馬場吉弘：「雷サージ解析技術の最新動向」, 電学誌, 135 巻 4 号, pp.203-205 (2015)
- (27) C. F. Wagner, “Surge Impedance,” Proc. IEEE, vol. 55, no. 9, pp. 1553-1566, Sep. 1967.
- (28) 松浦進, 野田琢, 浅川聡, 横山茂：「短時間領域における配電線のサージ応答特性」, 電力中央研究所報告, H06009, (2007)
- (29) 茂住卓史, 池内孝明, 福田権崇, 雨谷昭弘, 関岡昇三：「配電線における接地線のサージインピーダンス実験式」, 電学論 B, 122 巻 2 号, pp.223-231 (2002)

- (30) M. Kawai, "Studies of the surge response of transmission tower," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.83, no. 1, pp.30-34(1964)
- (31) 山本賢司, 河崎善一郎, 松浦虔士, 関岡昇三, 横山茂:「縮小モデルによる配電線コンクリート柱および接地線のサージインピーダンスの検討」, 電学論 B, 119 巻 7 号, pp.861-870 (1999)
- (32) 林屋均, 小口紀男, 山本浩志, 松浦和史:「電鉄用直流変電所における接地改善による耐雷性向上」, 電学論 B, 134 巻 2 号, pp.121-125 (2014)
- (33) 田中弘毅, 伊東和彦, 馬庭和之, 山下博史, 川原敬治, 長岡直人:「電鉄用直流変電所における接地改善による耐雷性向上」, IEEJ, HV-16-023, pp.17-20 (2016)
- (34) H. Tanaka, H. Yamashita, K. Kawahara, and N. Nagaoka, "Potential rises of grounding mesh and control lines of a traction substation for a shinkansen due to lightning surge," TC6.1-6, 2015 Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), Nagoya, Japan, pp. 153-156, 2015.
- (35) 山下博史, 田中弘毅, 前田和明, 藤田吉伸, 川原敬治:「山陽新幹線における変電所雷害事象に関する検討」, IEEJ, JIASC2015, vol. 5 no. 14, pp.175-178 (2015)
- (36) 日本工業規格:「低圧電気設備 第 4-41 部 安全保護-感電保護」, JIS 60364-4-41 (2010)
- (37) 山下博史, 田中弘毅, 前田和明, 藤田吉伸, 川原敬治:「山陽新幹線における変電所雷害事象に関する検討」, IEEJ, JIASC2015, vol. 5, no. 14, pp.175-178 (2015)
- (38) Electric Technology Research Association, "Surge protection technology of the protection and control system," Vol.57, No3, pp.113-114(2001)
- (39) 田中弘毅・長岡直人・伊東和彦・山野井隆・田川陽一・川原敬治:「電鉄用変電所接地網の雷サージ特性に関する実測と数値解析」, 平成 26 年電気学会産業応用部門大会, vol. 5, no. 2, pp. 141-144 (2014)
- (40) 野田琢・横山茂:「FDTD 法に基づく汎用サージ解析プログラムの開発」, 電学論 B, 121 巻 5 号, pp.625-632 (2001)
- (41) 電気協同研究会:「油入変圧器の保守管理」, 電気協同研究, 第 54 巻, 第 5 号 (その 1), (1999)
- (42) Imanishi: lightning Surge Analysis of Railway Signaling System and Modeling of Rails and an Impedance bond: master thesis, Doshisha University, March-2015
- (43) Japan Railway Electrical Engineering Association: Q & A of the track circuit,1999
- (44) H. Tanaka, S. Shida, K. Ito, T. Wada, D. Tsukamoto, K. Kawahara, H. Hirofumi, A. Hori, Y. Hayakawa and N. Nagaoka, "Modelling of an Impedance Bond and its Transient Response against Lightning Impulse," EEUG Conference and Meeting 2015, Grenoble, France, 2015, pp. 139-150.
- (45) Japan Railway Electrical Engineering Association: Q & A of the track circuit, 1999
- (46) 新井英樹:「鉄道信号設備の雷害対策に関する研究」, 東京大学博士論文, (2010-11)
- (47) 電気鉄道ハンドブック編集委員会編:「電気鉄道ハンドブック」, コロナ社 (2007-2)
- (48) 雨谷昭弘・笠井由紀:「等価均質線路モデルの配電系過渡現象解析への応用」, 電学論 B, Vol.114, No.10 pp.1059-1065 (1994-3)
- (49) 雨谷昭弘:「分布定数回路論」, コロナ社, (1990-2)
- (50) S. A.Schelkunoff: "The electromagnetic theory of coaxial transmission line and cylindrical shields", Bell Syst. Tech. J., Vol.13, pp.532-579 (1934-10)
- (51) F.Pollaczek: "Über das Feld einer unendlich langen echselstromdurchflossenen Einfachleitung", ENT, Band 3, Heft 9, pp.339-359 (1926)
- (52) R. Carson: "Wave propagation in overhead wires with ground return", Bell Syst. Tech. J., Vol.5, pp.539-554 (1926-10)
- (53) A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen and A. Castanheira: "The complex ground return plane: a simplified model for homogeneous and multi-layer earth return" IEEE Trans. PAS, Vol.100, No.8 pp.3686-3693 (1981-2)
- (54) 雨谷昭弘・布施郁子:「任意断面導体よりなる多導線系インピーダンス近似計算法」, 電学論 B, Vol.111, No.8 pp.896-902 (1991-10)
- (55) Diah Permata: "A Study on Impedance Measurement of Small-Capacitance Circuit using Transient Waveforms", doctor thesis, Doshisha University (2014-12)
- (56) A. Semlyen, A. Dabuleanu: "Fast and accurate switching transient calculations on transmission lines with ground return using recursive convolutions" IEEE Trans. PAS, Vol.94, No.2 pp.561-571 (1975-3)
- (57) 長岡直人:「周波数依存鉄塔モデルの開発」, 電学論 B, Vol.111, No.1 pp.51-56 (1991)
- (58) 池田陽紀・長岡直人・馬場吉弘:「内部導体を有する風力発電タワーの雷サージ回路解析モデル」, 電学論 B, Vol.135, No.3 pp.200-206 (2015)

- (59) N. Nagaoka and A. Ametani: "A development of a generalized frequency-domain transient program - FTP" IEEE Trans. Power Delivery, Vol.3, No.4 pp.1996-2004 (1998-10)
- (60) 田中弘毅, 伊東和彦, 馬庭和之, 山下博史, 川原敬治, 長岡直人: 「電鉄用直流変電所における接地改善による耐雷性向上」, IEEJ, HV-16-023, pp.17-20 (2016)
- (61) 新井英樹: 「鉄道信号設備の雷害対策に関する研究」, 電学論 B, vol.132, No.11, pp.881-884 (2012)
- (62) E.D. Sunde: "Earth conduction effects in transmission system", Dover Publications, Inc., New York (1968)
- (63) T. Uno, Electromagnetic Field and Antenna Analysis by FDTD Method, Corona Pub. Co. (1989) (in Japanese)
宇野亨: 「FDTD 法における電磁界およびアンテナ解析」, コロナ社(1998)
- (64) 雨谷昭弘, 長岡直人, 馬場吉弘, 菅雅弘: 「電気・電子回路解析プログラム EMTP 入門」, オーム社, (2001)
- (65) M.Ishii, T.Kawamura, T.Kouno, E.Ohsaki, K.shiokawa, K.murotani and T.Higuchi: "Multistory Transmission Tower Model for Lightning Surge Analysis", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.6, No.3 pp.1327-1335 (1991)
- (66) 電力中央研究所: 「発変電所侵入雷サージの実用的解析手法とその適用」, 電力中央研究所報告, T90068, (1991)
- (67) 電力中央研究所: 「発変電所および地中送電線の耐雷設計ガイド」, 電力中央研究所報告, T40, (1995)
- (68) 一般社団法人日本鉄道電気技術協会: 「解析 鉄道に関する技術基準 (電気編) 第三版」, pp.238-239 (2014)
- (69) 経済産業省: 「電気設備の技術基準の解釈 改正 20160418 商局第 7 号 平成 28 年 5 月 25 日付け」, 第 37 条 (2016)
- (70) Hiroki Tanaka, Keiji Kawahara, Yuichiro Hayakawa, Naoto Nagaoka: "An Equivalent Circuit Expressing Transient Potential Distribution in Earthing Mesh", The 51st International Universities Power Engineering Conference, UPEC2016, no.217 (2016)
- (71) 電力中央研究所: 「FDTD 法に基づくサージ解析コードの開発」, 電力中央研究所報告, T0004 pp.4-6 (2000)
- (72) 野田琢・横山茂: 「FDTD 法に基づく汎用サージ解析プログラムの開発」, 電学論 B, Vol.121, No.5 pp.625-632 (2001)
- (73) T. Noda and S. Yokoyama: "Thin Wire Representation in Finite Difference Time Domain Surge Simulation", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.17, pp.840-847, 2002.
- (74) 谷口洋平・馬場吉弘・長岡直人・雨谷昭弘: 「二次元円筒座標系における FDTD 計算のための細線導体模擬法」, 電学論 B, Vol.128, No.1 pp.263-269 (2008)
- (75) 谷口洋平・馬場吉弘・長岡直人・雨谷昭弘: 「FDTD 電磁界・サージ解析のための細線導体模擬法の改善」, 電学論 B, Vol.129, No.1 pp.198-204 (2009)
- (76) Measurements and Numerical Simulations for Lightning Protection of DC Traction Substation, Hiroki Tanaka, Keiji Kawahara, Kenji Hayashi, Naoto Nagaoka, (11th World Congress on Railway Research 2016 WCRR2016, Stella Polare Convention Centre, Milan, Italy)

謝辞

本研究は、同志社大学理工学部長岡直人教授の御指導のもとに遂行されたものであり、終始御親切な御教示、御鞭撻を賜りました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

また、本研究の過程において、終始懇親なる御指導と御鞭撻を賜わり、貴重な御助言を頂いた同志社大学理工学部馬場吉弘教授に厚く御礼申し上げます。

本大学入学時から、本研究の過程において、終始懇親なる御指導と御鞭撻を賜わり、貴重な御助言を頂いたモントリオール工科大学雨谷昭弘名誉教授に厚く御礼申し上げます。

また、梅田繁樹氏には終始懇親なる御指導と御鞭撻を賜わり、貴重な御助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。

これまでの研究過程において数々の御助言と御激励を賜り、執筆の機会を与えて下さいました西日本旅客鉄道株式会社電気部元部長大久保敬雄氏（現 西日本電気システム株式会社）、電気部長三津野隆宏氏、次長千代隆氏、電気技術室長大串裕郁氏、課長川原敬治氏、課長吉田孝則氏、担当課長志田洋氏および電気技術室の皆様、技術開発部の皆様、会社同期の皆様にご心より感謝致します。

公益財団法人鉄道総合技術研究所元電力技術研究部部長 長谷伸一氏（現 株式会社新陽社）、企画室企画室長 奥井明伸氏、電力技術研究部部長 兎束哲夫氏、き電研究室室長 重枝秀紀氏、ならびにき電研究室の皆様には出向期間4年間を含め、終始懇親なる御指導と御鞭撻を賜わり、貴重な御助言を頂きました。心より感謝致します。

本研究にあたり御協力を頂きました同志社大学電力系統解析研究室の大学院生の皆様、ならびに同研究室の学部生の皆様に感謝の意を表します。

最後に、本研究を進めるにあたり、日々体調管理に気を遣い、研究できる環境を整え、いつもそばで応援してくれた妻 麻衣、元気いっぱいの笑顔で応援してくれた長男 勇飛、次男 海凜、長女 陽葵にご心より感謝します。また、遠方から応援してくれた父 一幸、母 京子にご心より感謝します。