

浮上式鉄道のき電回路における 零相高調波共振の基礎検討

重枝 秀紀* 奥井 明伸* 中道 好信**

Study of Zero-sequence Harmonic Resonance in MAGLEV Feeding Circuit

Hidenori SHIGEEDA Akinobu OKUI Yoshinobu NAKAMICHI

A feeding circuit for a superconducting magnetic levitation train system (MAGLEV) consists of feeder cables and armature coils which show characteristics of a distributed-parameter line. Electric power to drive trains is fed by inverters whose output voltage contains a large amount of harmonics. As a result, a harmonic resonance may occur in the feeding circuit. This paper reports measurement results of harmonic-resonance characteristics of the feeder cables, especially for zero-sequence harmonics. This paper also compares the measurement results with computer simulation results.

キーワード：浮上式鉄道，き電回路，高調波，共振，ケーブル

1. はじめに

列車の駆動方式として地上一次リニアシンクロナスマータ (LSM) を採用する超電導磁気浮上式鉄道 (以下、浮上式鉄道という) では、地上設備として LSM の電機子コイル (推進コイル) と、駆動用電力を供給する電力変換装置、および両者を結び送電するき電ケーブル等が必要である。このようなシステムでは、電力変換装置が発生する高調波電流が、き電ケーブルと推進コイルより成るき電回路から大地に漏洩し、通信線路に対して誘導障害等の影響を及ぼす可能性がある。特に、き電ケーブルや推進コイルは電氣的防護の観点から絶縁体の外側に遮へい層を設けてそれを接地する必要がある、結果として大地を帰路とする零相成分の高調波電流が漏洩しやすくなる。さらに、き電回路は分布定数回路としての特性を有することから、高調波の周波数によっては共振が発生し、漏洩電流量が大きくなることが懸念される。

本稿は、き電回路の構成要素の一つであるき電ケーブルを対象として、零相高調波に対する回路共振特性の測定試験結果、および実測と計算機シミュレーションとの比較検証について報告するものである。

2. き電回路の構成

浮上式鉄道におけるき電回路の構成例を図1に示す。列車を駆動するために必要な電力は、電力変換変電所に

設置されるコンバータおよびインバータによって列車の速度に応じた周波数の三相交流に変換され、き電ケーブルおよびき電区分閉装置を経て、一定の長さ毎に区分された推進コイル群 (セクション) に供給される。図1の回路構成は3重き電方式と呼ばれており、3系統 (A系～C系) のインバータおよびき電回路を有している。各系統を、列車の両側でずらして配置したセクションに順番に接続することにより、1系統が故障した場合においても列車の走行が可能となるよう考慮されている。

き電ケーブルの代表的な構造を図2に示す。き電回路は三相3線構成、または三相3線に中性線を加えた三相4線構成があるが、建設コスト等の観点から、将来的には三相3線構成になるものと想定される。三相3線構成のき電回路に対しては、図2に示す3本の架橋ポリエチ

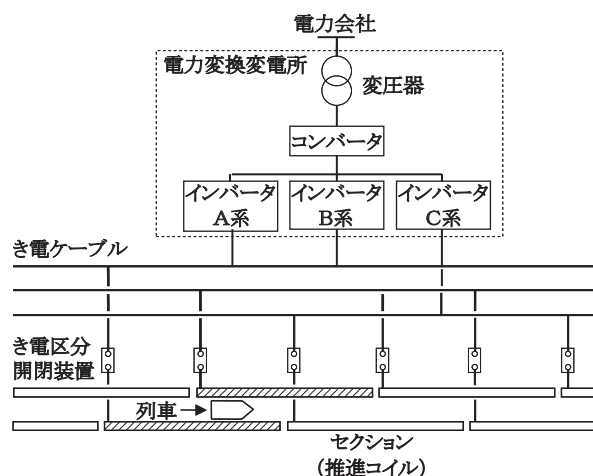


図1 き電回路の構成例

* 電力技術研究部 (き電)

** 研究開発推進室

特集：浮上式鉄道技術とその応用

レン絶縁ケーブルを撚り合わせた、トリプレックス形 (CVT) ケーブルが使用される。各ケーブルの絶縁層の外側には導電性の遮へい層があり、厚さ0.1mm程度の銅テープをらせん状に巻き付けたものが一般的である。この遮へい層は、電気的防護の観点からある程度の間隔で接地し、大地と同等の電位とすることが必要である。浮上式鉄道においては、図1に示すようにき電区分閉装置の設置箇所毎にき電ケーブルの分岐点が存在することから、遮へい層は原則として各分岐点で接地される。遮へい層の接地方法としては、図3に示すように、変電所に近い方 (電源側) またはケーブル終端に近い方 (終端側) のいずれか一方を接地する片端接地、または両方を接地する両端接地が考えられる。ただし、両端接地の場合には、直流電気鉄道等に起因する迷走電流が遮へい層に流入し、遮へい層の温度上昇等を招く可能性がある。

き電ケーブルは、心線と遮へい層が薄い絶縁層をはさんで同心円上に配置されていることから、架空線と比較

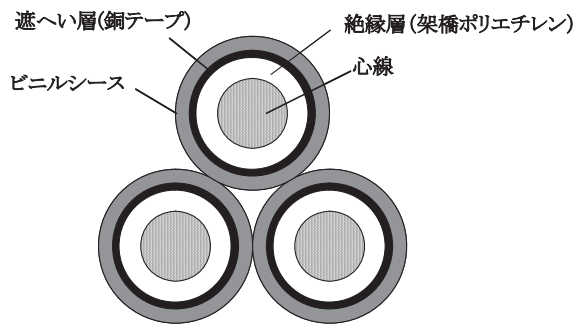


図2 き電ケーブルの構造 (三相3線構成)

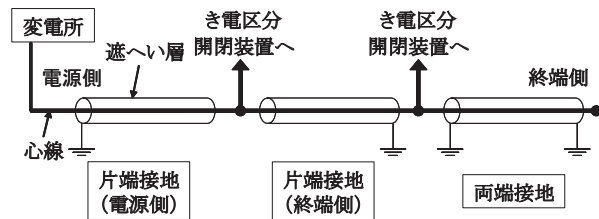


図3 ケーブル遮へい層の接地方法

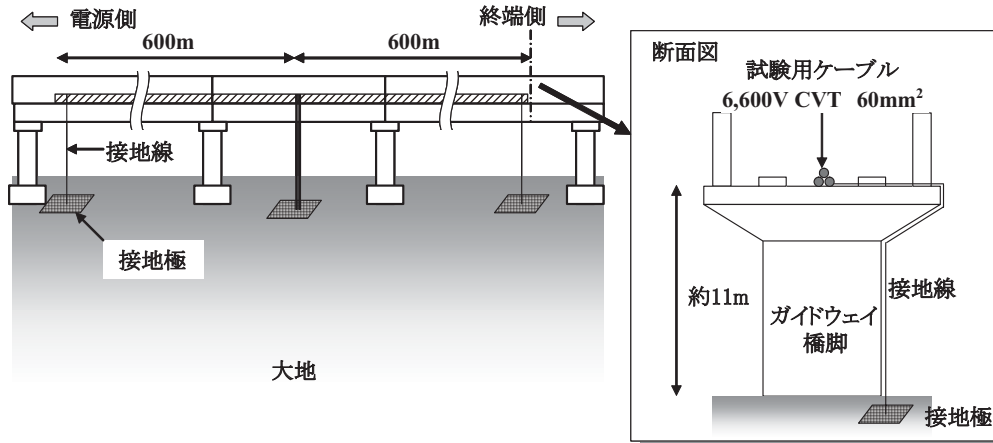


図4 試験用ケーブルの概要

して静電容量が大きくなり、結果として、より低い周波数で共振する分布定数回路の特性を有している。一般に、インバータの出力には多量の高調波成分が含まれており、高調波の周波数とき電ケーブルの共振周波数が一致する場合には、共振により高調波電圧・電流の拡大が生じる。

3. き電ケーブル共振特性の測定

3.1 試験用ケーブルの敷設

筆者らは、き電回路における高調波共振について様々な検討を行ってきた^{1)~3)}。これまでの検討の結果、正相または逆相の高調波に関しては、文献3)に示すとおり、理論解析によつてき電回路の共振特性を求めても実用上問題ないと考えている。一方、零相成分の高調波に関しては、ケーブルの遮へい層を流れる高調波電流が、接地箇所において大地に流出する。この場合、心線と遮へい層を各々別導体とする多線条モデルで考える必要があり、理論解析によるき電回路特性の計算は困難である。そこで、き電ケーブルの零相高調波共振特性の基礎検証を目的として、き電ケーブルを模擬するための試験回路 (試験用ケーブル) を敷設し、高調波電圧を印加した場合の電圧・電流特性について測定を行うこととした。

試験用ケーブルとして、旧宮崎実験線のガイドウェイ上に6.6kV、60mm²のCVTケーブルを1200m敷設した。その概要を図4に示す。敷設したケーブルは600m毎に区分されており、各々の遮へい層について片端あるいは両端接地ができるように、接地極と接地線を設けている。

3.2 共振特性の測定結果

試験用ケーブルを使用して、遮へい層の接地方式を変えながら、20kHzまでの周波数帯域で零相電圧を印加した場合の電圧・電流を測定した。遮へい層の接地条件を図5に示す。便宜上、本稿では電源に近い方のケーブル600m分を第1ケーブル、遠い方を第2ケーブルと称する。図5 (a) において、四角で囲んだ測定項目はすべての条

件に共通して測定したものである。条件 (a) の遮へい層非接地は、実設備では行われぬが、他の条件との比較の目的で実施した。

測定した回路各部の電圧・電流より、試験用ケーブルの回路特性として次の①から④までの評価項目を求めた。①のインピーダンス以外の各評価項目については、測定値を電源電圧で除算し、規格化している。

- ①電源から見た回路インピーダンス
- ②中間点および終端における心線電圧
(心線電圧/電源電圧で表す)
- ③中間点の遮へい層非接地端電圧 (条件 (d) を除く)
(遮へい層電圧/電源電圧で表す)
- ④接地電流および吸上電流
(接地・吸上電流/電源電圧で表す)

各評価項目の結果について、横軸を周波数としたグラフを図6～図9に示す。これらの測定結果より明らかになることを次に要約する。

(1) 回路インピーダンス (図6) について、いずれの条件においても共振によりインピーダンスが極小となる周波数が存在し、総じて片端接地条件の場合に共振周波数が低くなる。一方、共振時のインピーダンスが最低となるのは両端接地 (条件 (d)) の場合である。なお、条件 (b) では6kHz近傍で共振した後、10kHzを境に再度インピーダンスが低下しており、20kHz

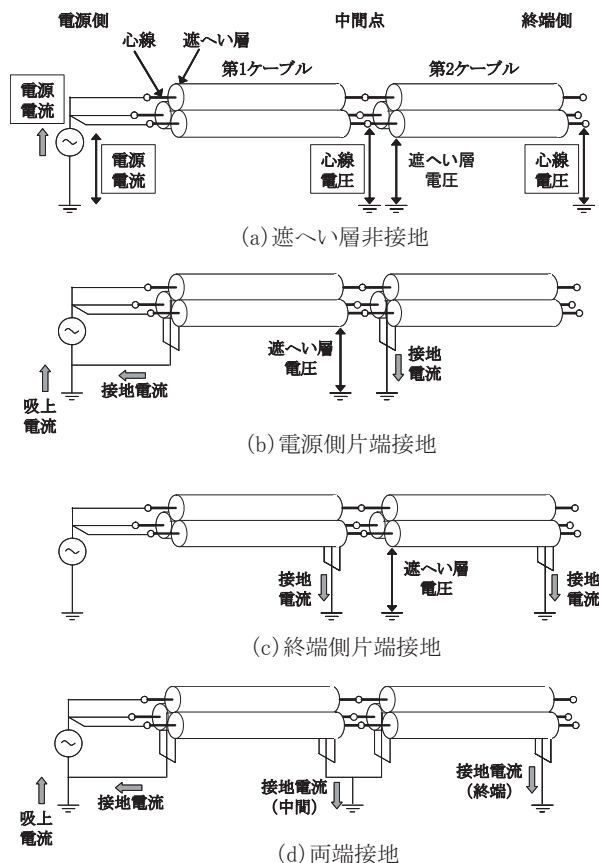


図5 共振特性の測定条件

を超えたところにも共振点が存在する可能性がある。

- (2) 心線電圧 (図7) について、いずれの条件も共振点近傍において電源電圧の数倍程度に拡大し、基本的にケーブルの中間点より終端の方が大きくなる。ただし、電源側片端接地 (条件 (b)) においては、共振時における中間点および終端の心線電圧はほぼ同じであった。心線電圧が最大となるのは遮へい層非接地 (条件 (a)) の場合である。
- (3) 中間点における遮へい層電圧 (図8) について、非接地 (条件 (a)) ではすべての周波数帯域において、心線電圧 (図7 (a)) の80%程度の電圧が観測された。一方、片端接地条件では、商用周波数に近い0.1kHzにおいて遮へい層電圧はほとんど観測されず、接地により遮へい層が大地と同電位にあることがわかる。一方、周波数が高くなると、遮へい層電圧が電源電圧以上となる場合がある。

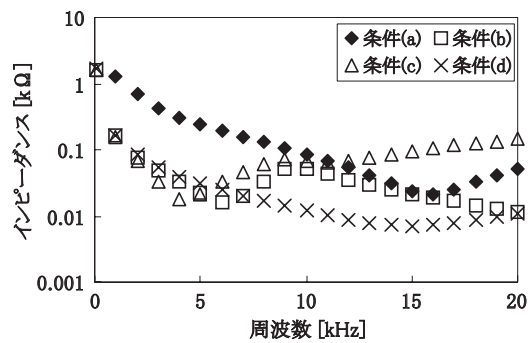
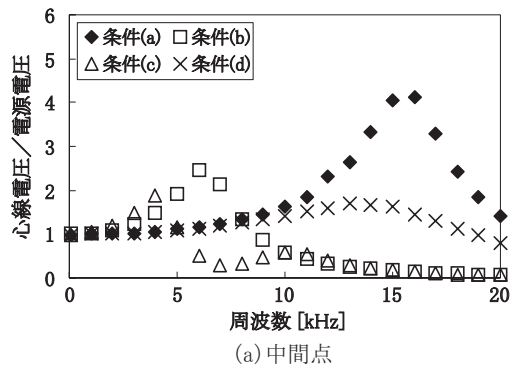
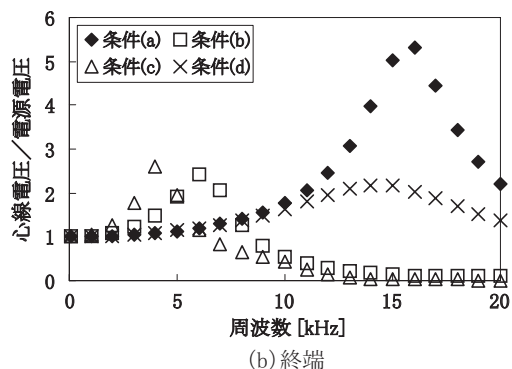


図6 回路インピーダンスの特性



(a) 中間点



(b) 終端

図7 心線電圧の特性

特集：浮上式鉄道技術とその応用

(4) 遮へい層の接地電流 (図9 (a), (b)) について、第1ケーブル遮へい層の電源側を接地する条件 (b) および条件 (d) では、接地電流が金属導体を介して電源に帰還するため、比較的大きな電流が観測される。その他の接地電流はすべて大地を経由して帰還する電流であり、基本的に第1ケーブルと第2ケーブル

各々の接地線から流出した電流の和が、吸上電流 (図9 (c)) となって観測される。吸上電流のピーク値が最小となるのは両端接地 (条件 (d)) であり、大部分の電流が第1ケーブル遮へい層を経由して帰還している。なお、遮へい層非接地とした場合 (条件 (a)) においても、共振時には大きな吸上電流が観測される。

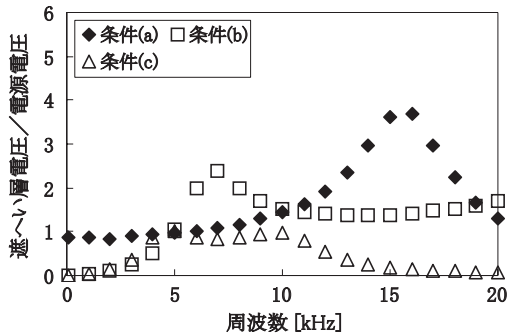
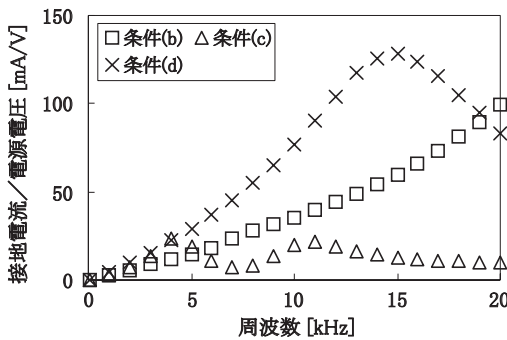
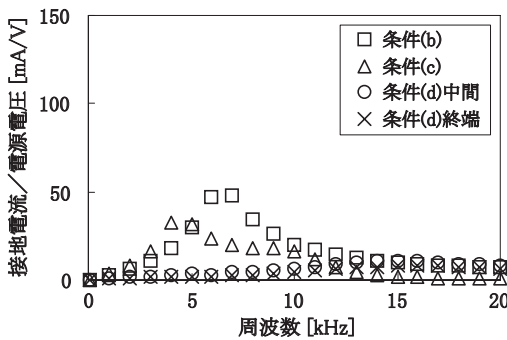


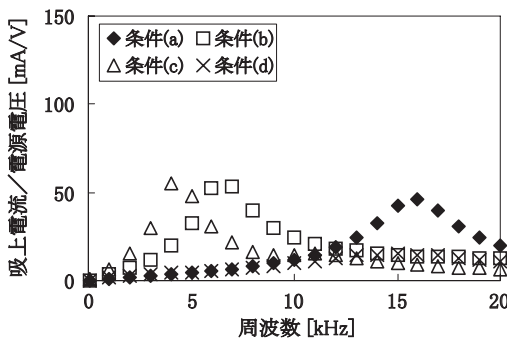
図8 遮へい層電圧の特性



(a) 第1ケーブル遮へい層の接地電流



(b) 第2ケーブル遮へい層の接地電流



(c) 吸上電流

図9 接地電流・吸上電流の特性

3.3 測定結果に対する考察

測定結果より得られた試験用ケーブルの零相高調波特性を、遮へい層の接地条件毎に考察する。

(1) 遮へい層非接地の場合

心線～遮へい層間の静電容量と遮へい層～大地間の静電容量の比に応じて、遮へい層～大地間に大きな電圧が現れる。これは零相高調波に限らない特性であり、遮へい層の接地が必要となる主要因である。また、この静電容量により、遮へい層が非接地にもかかわらず心線から大地に漏洩する電流が発生し、共振時の吸上電流は片端接地条件のそれと同程度であった。

(2) 電源側片端接地の場合

第1ケーブル遮へい層の非接地端電圧は、商用周波域では接地の効果により非常に小さいが、高周波領域に対しては電源電圧を超える値が観測された。これは、共振点 (6kHz) 近傍においては中間点の心線電圧上昇の影響、それ以降の周波数域においては遮へい層を流れる電流に起因するものである。回路に大きな高調波電圧が印加される場合、非接地端の電圧上昇に留意する必要がある。

大地帰路電流については、第2ケーブル遮へい層の接地電流がほぼ吸上電流として観測されており、大地を経由していることがわかる。また、6kHz近傍で電流が極大となることから、心線～第2ケーブル遮へい層～大地の経路で構成される回路の共振周波数が6kHz近傍であることを示している。

(3) 終端側片端接地の場合

第2ケーブル遮へい層の非接地端電圧も (2) 項と同様に電源電圧と同程度になる場合があり、遮へい層を流れる電流に起因するものと想定される。大地帰路電流については、各遮へい層の接地電流の和が吸上電流となり、共振時の電流値としては (2) 項と同程度であった。

(4) 両端接地の場合

遮へい層電圧は接地されているため問題ない。共振時に電源から回路に流入する高調波電流は大きくなるが、大部分は遮へい層を経由しており、大地を経由する吸上電流は全条件の中で最小であった。ただし、この条件では第1ケーブル遮へい層の電流が大きくなり、遮へい層の電流容量に注意が必要である。

4. 実測とシミュレーションの比較検証

4.1 シミュレーションモデルの考え方

2章で述べたとおり、浮上式鉄道のき電回路は分布定数回路で表される。一般に、線路長が十分短い分布定数回路は近似的に集中定数回路で表すことが可能であり、近似の精度からT形あるいはπ形の等価回路が用いられる⁴⁾。図4の試験用ケーブルについて、本章ではπ形等価回路を基本とした図10に示す等価回路を用いてシミュレーションを行った。図10では600mのケーブル1相分を1個のπ形等価回路で表しており、2個の等価回路の心線同士を接続して1200mのケーブルとなる。遮へい層は、図5の測定条件に合わせて接地する。

4.2 回路定数の決定

零相高調波に対する回路特性を求めるには、回路定数として大地帰路インピーダンスを計算する必要がある。計算方法はいくつかあるが、ここでは汎用の回路解析プログラムであるEMTPに実装されているCABLE CONSTANTSの機能を用いて、表1に示す試験用ケーブルの

断面寸法に基づいて回路定数を求めた。なお、具体的な計算式については文献4)等に詳述されている。

上記に基づいて計算した、0.1kHz、10kHzおよび20kHzにおけるケーブル600m分の回路定数を表2に示す。一般に、導体の抵抗およびインダクタンスの値は表皮効果等の影響により周波数に依存して変化する特性があり、抵抗は周波数とともに増加、インダクタンスは減少する。一方、静電容量は周波数に依存せず一定の値となる。ここで、遮へい層～大地間の静電容量 C_{Sn} については、計算上0.146μFという値が得られた。しかしながら、遮へい層非接地時の遮へい層電圧が心線電圧の80%程度であったという測定結果を考慮すると、 C_{Sn} は心線～遮へい層間の静電容量 C_{Cn} の30%程度となるべきであ

表1 試験用ケーブルの寸法 (単位: mm)

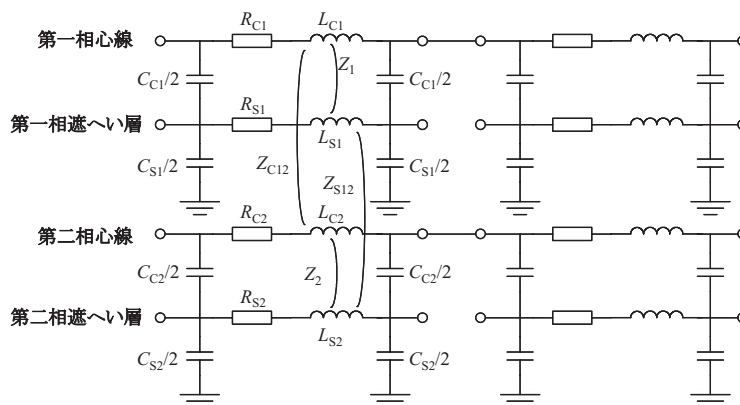
心線の外径	9.3
絶縁層の厚さ (外径 ^{*1})	4.0 (18)
遮へい層の厚さ (外径)	0.1 (18.2)
ビニルシースの厚さ (外径 ^{*2})	2.0 (23)

※1: 絶縁層内側および外側の半導電層の厚さを含む

※2: 遮へい層押さえテープの厚さを含む

表2 試験用ケーブルの回路定数計算結果 (600mあたり)

図10の定数	0.1 kHz	10 kHz	20 kHz
R_{Cn}, L_{Cn}	0.210 Ω, 1.538 mH	5.631 Ω, 1.255 mH	10.357 Ω, 1.217 mH
R_{Sn}, L_{Sn}	1.862 Ω, 1.428 mH	6.862 Ω, 1.167 mH	11.367 Ω, 1.131 mH
C_{Cn}, C_{Sn}	0.116 μF, 0.146 μF (0.034 μF)		
Z_n	0.058 + j0.897 Ω	5.057 + j73.32 Ω	9.560 + j142.1 Ω
Z_{Cnm}, Z_{Snm}	0.058 + j0.827 Ω	5.057 + j66.29 Ω	9.560 + j128.1 Ω



- R_{Cn} : 第n相心線の抵抗
- R_{Sn} : 第n相遮へい層の抵抗
- C_{Cn} : 第n相心線～遮へい層間の静電容量
- Z_n : 第n相心線～遮へい層間の相互インピーダンス (抵抗およびインダクタンス, 以下同じ)
- Z_{Cnm} : 第n相心線～第m相心線間の相互インピーダンス
- Z_{Snm} : 第n相遮へい層～第m相遮へい層間の相互インピーダンス
- L_{Cn} : 第n相心線の大地帰路自己インダクタンス
- L_{Sn} : 第n相遮へい層の大地帰路自己インダクタンス
- C_{Sn} : 第n相遮へい層～大地間の静電容量

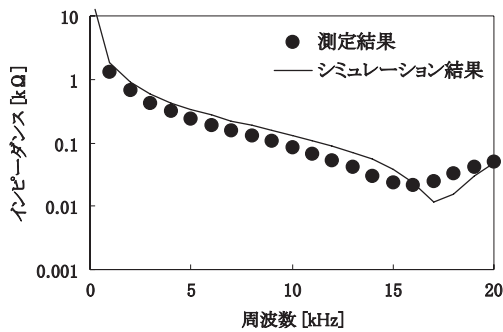
図10 試験用ケーブルの集中定数等価回路 (第三相の図示は省略している)

特集：浮上式鉄道技術とその応用

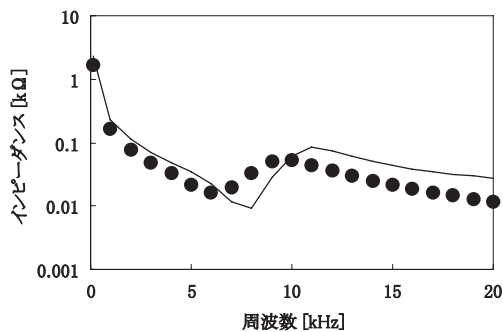
る。 C_{Sn} の計算値が大きくなる理由は不明であるが、測定結果を勘案し、 C_{Sn} については表2の括弧内に示す値を採用した。その他の回路定数については、すべて計算結果をそのまま採用した。

4.3 シミュレーションと実測の比較

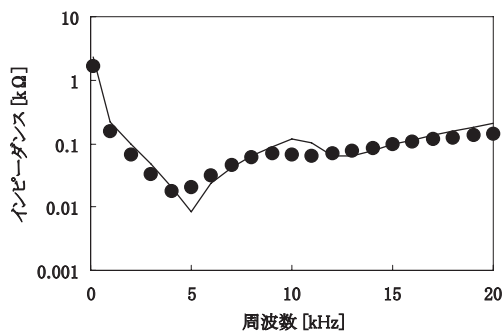
前節までの等価回路および回路定数に基づいて、図5



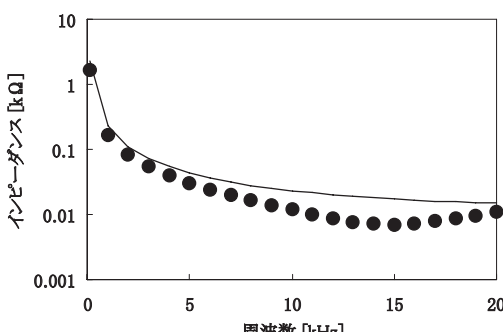
(a) 遮へい層非接地



(b) 電源側片端接地



(c) 終端側片端接地



(d) 両端接地

図11 実測とシミュレーションの比較

の各接地条件に対する試験用ケーブルの回路インピーダンス特性を、EMTPを用いたシミュレーションにより求めた。測定結果をマーカー(●)で、シミュレーション結果を実線で示したグラフを図11に示す。なお、シミュレーションにおいては表2に示す周波数の他、測定と同じ周波数に対して個々に計算した回路定数を適用した。

図11の各グラフにおいて測定結果とシミュレーション結果を比較すると、共振周波数等のずれが見受けられる部分もあるが、全体的な周波数特性の傾向については、接地条件に依存する回路特性の変化を十分に表している。き電ケーブルの零相高調波特性計算に対し、本稿の等価回路および回路定数の考え方は妥当であるといえる。

5. 結論

き電回路の基本構成要素であるき電ケーブルについて、零相高調波に対する共振特性を測定するとともに、シミュレーションとの比較検証を行った。得られた成果を次に要約する。

- (1) ケーブルの共振特性について、遮へい層の片端接地を行う場合は、高調波電流が接地線より大地を經由して帰還する。また、遮へい層非接地端の電圧に留意する必要がある。一方、遮へい層の両端接地は、遮へい層電圧および大地漏洩電流の低減に有効であるが、迷走電流等の問題により制約を受けることから、これを代替する接地方法について検討が必要である。
- (2) シミュレーションモデルについて、 π 形等価回路を基本とした集中定数回路により零相高調波に対するき電ケーブルの共振特性を表すことができる。今後の課題として、回路定数決定方法の深度化が挙げられる。

本稿で提案した等価回路をき電ケーブル長に応じて直列接続することにより、将来の営業線に対しても零相高調波共振特性の予測が可能であると考えられる。

なお、本研究は国土交通省補助金を受けて行ったものである。

文献

- 1) 中道好信, 重枝秀紀, 池田春男: 磁気浮上式鉄道における推進コイルを含むき電系の特性, 平成9年電気学会産業応用部門全国大会, No.207, 1997
- 2) 重枝秀紀, 奥井明伸, 赤木泰文: 浮上式鉄道のき電回路における高調波共振解析, 電気学会論文誌D, Vol.126, No.8, pp.1095-1103, 2006
- 3) 重枝秀紀, 奥井明伸, 中道好信: LSMき電回路における高調波共振解析, 鉄道総研報告, Vol.21, No.9, pp.23-28, 2007
- 4) 関根泰次, 雨谷昭弘: 分布定数回路論, コロナ社, 1990