

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

き電回路の高調波共振を解明する

交流き電回路では、ある特定の周波数帯域で電圧・電流の高調波成分が共振によって大きくなることがあります。近年、パルス幅変調 (PWM) 制御の電気車 (PWM 制御車) の導入にともない、従来よりも高い周波数帯域において高調波の共振が生じ、電磁環境などへの新たな影響が顕在化しつつあります。ここでは、PWM 制御車による高調波電圧共振などを精度よく評価できる新たな解析モデルを提案し、その妥当性を現地試験により評価するとともに、き電回路における高調波共振の発生条件などを定量的に明らかにした結果について紹介します。



赤木 雅陽
Masataka Akagi
電力技術研究部
き電研究室
主任研究員
【専門分野】変電設備の設計

交流き電回路における高調波共振とその影響

新幹線などの電気車が高速で走行するためには多くの電力を必要とします。また、変電所はその設置費用が高額のため、変電所の間隔は極力長い方が好都合です。そこで、整備新幹線に代表される近年開業した交流き電区間では、一般に大電力を長距離にわたって安定して供給可能なAT (単巻変圧器) 方式交流き電回路が採用されています (図1)¹⁾。ここでは、AT 方式交流き電回路に特有の高調波共振について概説します。

高調波共振の原理

トローリー線をはじめとする電車線設備は、線路方向にはインダクタンス成分を、対地方向にはキャパシタンス成分を有しています (図2)。このことから、交流き電回路は分布定数としての性質を有することが知られており²⁾、上記き電回路において電気車が高調波 (電力会社から供給される60Hzなどの商用周波数に対して数十倍の周波数成分を有する電圧・電流) を発生させると、キャパシタンス成分の存在が影響して、高調波共振 (電圧・電流の発生源とは別の箇所において、ある特

定の周波数帯域の電圧・電流が極端に増減する現象) が生じます。とくに、AT 方式交流き電回路は、そのき電距離長がBT (吸上変圧器) 方式交流き電回路を始めとする従来のき電回路に比べ長い (通常30~40km程度) ことから共振周波数が相対的に低くなるという特徴があります。

高調波共振の影響

AT 方式交流き電回路における高調波共振には、数百Hzの低周波帯域での電流共振と、数千Hzの高周波帯域での電圧共振の二つが大きな影響を与えることが知られています (図3)。電流共振は、鉄道沿線に敷設された通信回路に対して通信誘導障害などの悪影響を及ぼすことがあります。これまでの知見²⁾では、たとえばき電距離長30kmにおいておおむね900Hz程度に共振周波数が現れます。この帯域は通信誘導への影響がとくに大きいので、何らかの対策が必要です。

一方、近年は数千Hzの高周波帯域での電圧共振も無視できません。パルス幅変調 (PWM) 制御手法では、基本波成分 (高調波を含まない、元の波形) の周波数よりも高周波数でスイ

チング動作を行う半導体スイッチを適宜ON-OFFさせて所定の幅のパルスを生成することによって、直流から任意の振幅を有する交流波形を得ています(図4)。その際、電気車内部で疑似的な交流波形を複数個組み合わせることで滑らかな交流波形を生成しています³⁾が、残念ながら高調波成分が多少残存してしまいます。

ここで、近年のPWM制御車を念頭に、生成目標とする交流波形として、実効値27kV(ピーク値:38.2kV)、周波数60Hzを仮定しこれに対して、基本波ピーク値比1%の含有率にて1.86kHzの高調波成分を合成した波形を図5(a)に、共振の影響を想定し基本波ピーク値比10%で同じく1.86kHzの高調波成分を合成した波形を図5(b)に示します。

合成後の波形における実効値は両者ともほとんど変化ありませんが、図5(b)ではピーク値が10%増加しており、保護装置が過電圧と誤認識するなどの問題が生じる可能性があります。

新たな高調波共振解析モデルの提案

解析モデルの提案

これまで電流共振については種々の検討が行われてきました²⁾³⁾が、より高い周波数で問題となる電圧共振についてはどのような条件で発生するのか未解明でした。

電流共振の検討では、高調波発生源を定電流源とみなし、電気車内部の回路定数(とくに電気車用主変圧器の仕様)は無視するという仮定を行っていました。この場合、電気車の在線本数は高調波電流の発生量には影響するものの、共振周波数には影響しません。一方、高周波帯域で生じる電圧共振の特徴に関して調査した結果、電気車の本数が変わると共振周波数が変化する

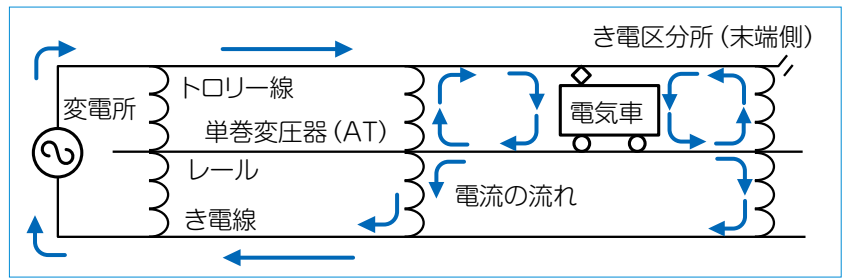


図1 AT方式交流き電回路の概要

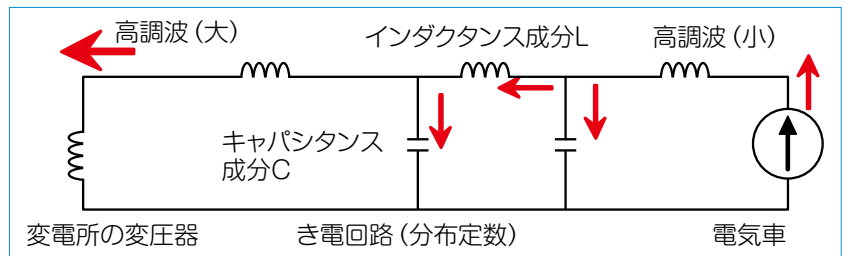


図2 き電回路の特性に起因する高調波共振の発生(共振時の模式図)

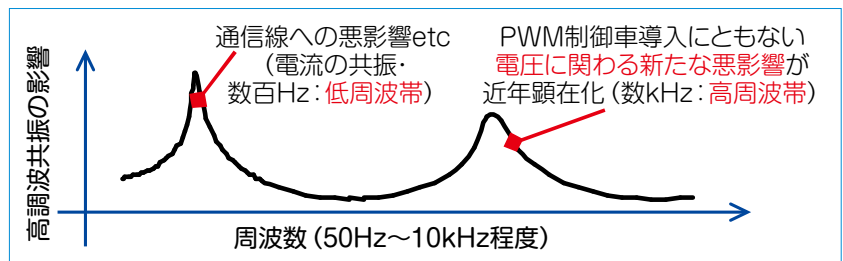


図3 高調波共振の影響と周波数帯域との関係

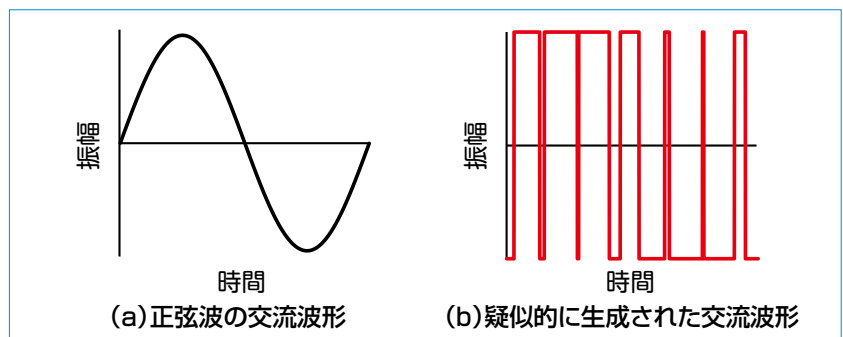


図4 パルス幅変調(PWM)制御による交流波形の生成

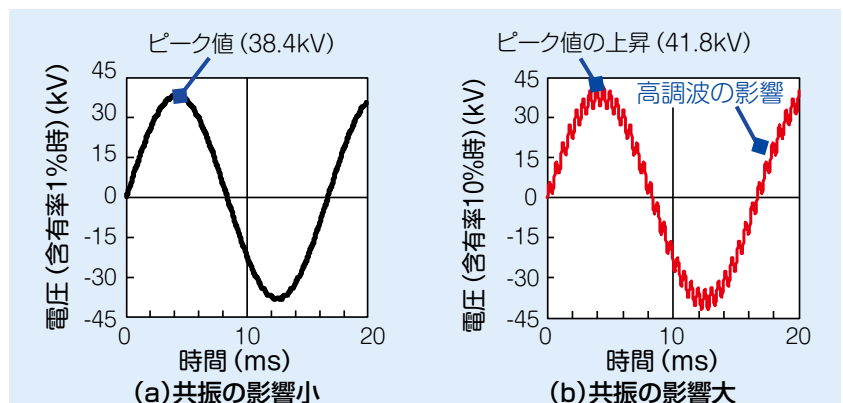


図5 高調波電圧共振の影響(基本波成分:60Hz)

など⁴⁾、これまでの仮定では説明できない現象が明らかになりました。これは、これまで無視していた電気車内部の回路定数の影響によるものです。

そこで、PWM制御車走行時の高調波特性を表す新たな解析モデルとして、従来の検討で想定していた定電流源に代わり、新たに電圧源とインダクタンス成分を直列に接続したモデルを提案しました⁴⁾⁵⁾。インダクタンス成分は電気車用主変圧器の漏れインダクタンスに対応し、電圧源はPWM制御によって電気車用変圧器の二次側に生成・印加される電圧波形の高調波成分に対応します。この解析モデルを用いて評価することにより、PWM変換器を含む回路全体の高調波共振特性が算出可能となります。従来のモデルと新たな解析モデルとの差異を図6に示します。

この解析モデルは複素数の定数、あるいは周波数に依存する定数などから構成される複雑なモデルで、手計算による解析は困難です。そこで、分布定数の性質を有するき電回路の特徴が電子回路の伝送線路と似ていることに着目し、伝送線路の解析機能を有する汎用電子回路シミュレーターソフトSPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) を用いて解析を行う評価システムを構築しました。

解析モデルの妥当性評価

ここでは、提案した解析モデルの妥当性検証の一環として、新幹線のAT方式交流き電回路を対象とし、電圧拡大や共振周波数について解析結果と実測との比較を行いました。

解析では図7に示すように、電気車に搭載されたPWM変換器の出力(注入電圧)に対する、変電所側での着電圧の増幅度を電圧拡大特性と定義し、0Hz~10kHzまでの周波数帯域につ

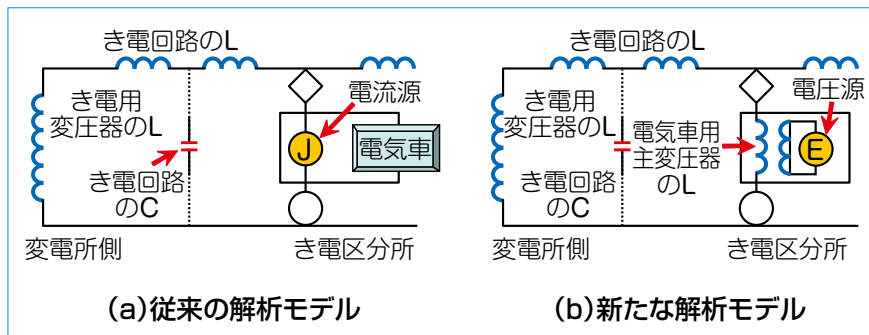


図6 解析モデルの提案

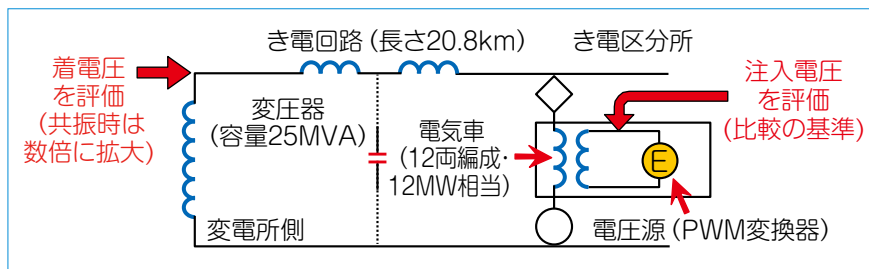


図7 解析モデル妥当性検証のための解析条件(電圧拡大特性)

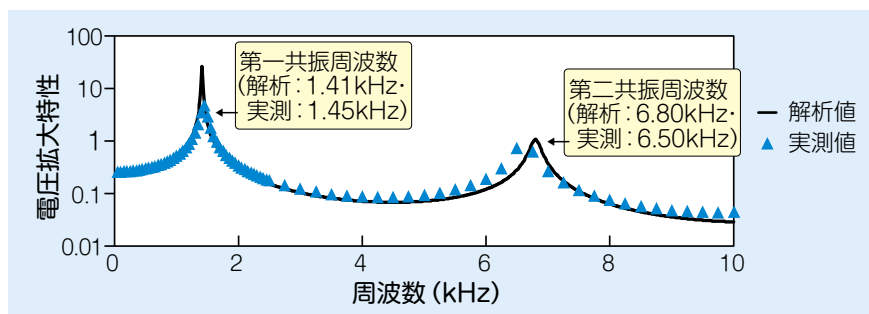


図8 共振周波数に関する実測・解析結果比較

いて評価しています。電気車についてはき電区分所に在線しているものと仮定し、ある新幹線区間におけるき電回路の定数を想定したデータ(特性インピーダンス: 240Ω)を解析モデルに入力しました。

次に、提案した解析モデルの妥当性を検証するため、営業線き電回路での現地試験により電圧拡大特性を評価しました⁵⁾。営業設備では、電気車に搭載されたPWM変換器から発生した数百Vの高調波電圧は、電気車用主変圧器とパンタグラフを介してき電回路に注入されますが、それを現地試験で直接再現することは容易ではありません。そこで、PWM変換器についてはき電区分所に設置した可聴帯電圧アン

プ(20kHzまでの電圧を出力可能)で、電気車用主変圧器およびき電用変圧器のインダクタンス成分は高周波に対応したリアクトルで模擬しました。各点の高調波電圧は、両者の同期を取りつつ、高調波成分の評価機能を有する測定器で測定しました。

図8に電圧拡大特性に関する実測結果と解析結果を示します。事前の解析で求めた共振周波数(1.41kHzと6.80kHz)に対し、実測の共振周波数は誤差4%以内で一致しており、解析モデルの妥当性が確認されました。

高調波共振の抑制に向けた解析 高調波共振発生条件の解明

電圧共振の発生条件について、提案

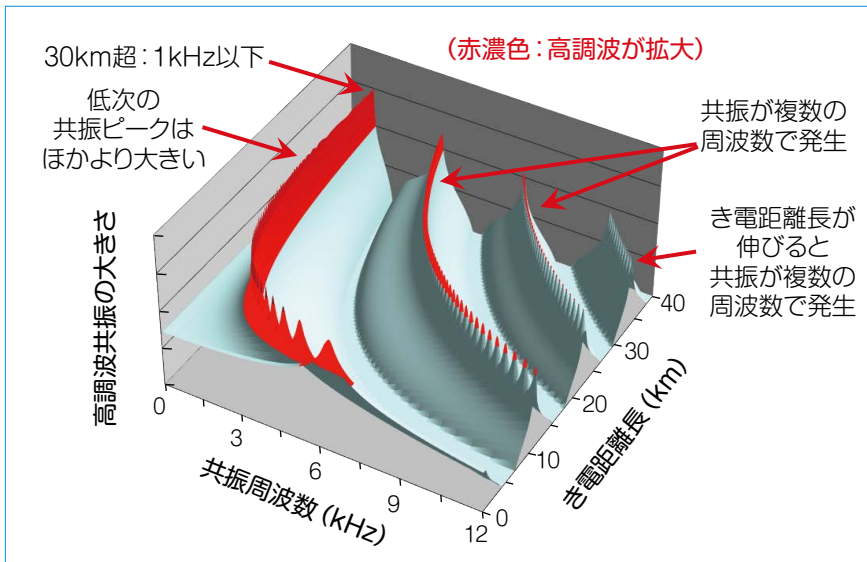


図9 き電回路における高調波共振の発生条件(距離長依存要素)

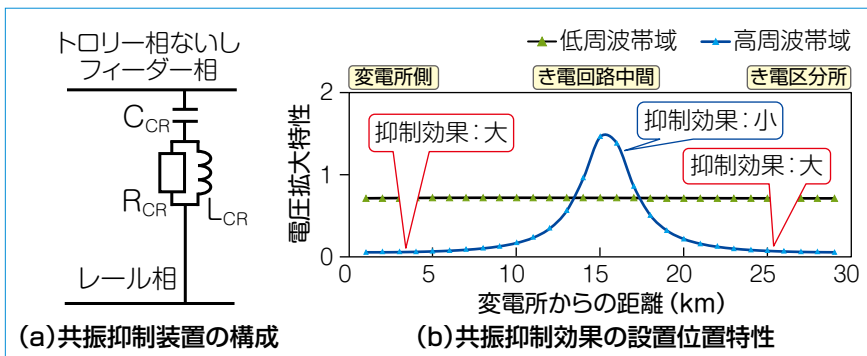


図10 共振抑制装置の設置位置とその効果

した解析モデルを基に定量的に検討しました(図9)。なお、電気車はき電区分所に在線しているものとし、き電距離長を0~40kmまで変化させています。

図9にて赤濃色で強調している箇所は電圧共振によって電圧の増幅が生じているところを示します。一般に、き電距離長は数km程度から数十km程度までと幅がありますが、き電距離長が長い場合、複数の周波数において共振が生じることがわかります。そのうち、もっとも周波数が低い共振のピークの大きさはそれよりも高周波側の共振ピークよりも大きめであることもうかがえます。

一方き電距離長が30km以上の場合、最初の共振周波数は従来検討と同等の周波数(1kHz以下)になっていました。

ただし従来の電気車と異なり、近年の電気車ではスイッチング周波数が上昇した影響で、1kHz以下の帯域に大きな高調波電圧発生源は基本的に存在していません。このため、き電距離長が30km以上で、近年の電気車のみが走行する場合、低周波帯域に関する電圧拡大については、支障は生じないと思われれます。

共振抑制装置の配置条件

従来、き電回路の高調波電流共振を抑制するためには、図10(a)に示す共振抑制装置をき電区分所へ設置することが効果的とされてきました²⁾。しかし、電圧共振を抑制するための共振抑制装置の設置条件はこれまで未解明でした。

そこで、き電区間内における共振抑

制装置の設置位置に関する解析を行ったところ、1kHz程度の低周波帯域についてはどこに設置しても同じような抑制効果が得られました(図10(b))。一方、数kHzの高周波帯域については、き電区分所側および変電所側のいずれでも設置効果がある一方、中間部に設置した場合は抑制効果が得られないことが判明しました。

まとめ

PWM制御車に対応した高調波電圧共振解析モデルの妥当性について、解析・実験により検証しました。その結果、共振周波数の実測値と解析値は実用上十分な精度で一致することを確認しました。また共振抑制装置の配置条件を検討したところ、数kHzの高周波帯域については、き電区分所側および変電所側いずれに設置しても抑制効果があることを明らかにしました。これらの成果は、新型車両などの導入時における共振抑制対策の策定に活用いただけるものと考えます。

最後に、現地試験にご協力いただいた関係各位に謝意を示します。[RRR]

文献

- 1) 赤木雅陽：変電所から車両までの電気の流れ, RRR, Vol.66, No.10, pp.14-17, 2009
- 2) 持永芳文, 久水泰司, 吉田順重, 中野明良, 松橋登喜雄：ATき電回路における高調波共振と抑制対策, 電気学会論文誌D(産業応用部門誌), Vol.114, No.10, pp.978-986, 1994
- 3) 電気学会交流電気鉄道用車両の高調波対策協同研究委員会：交流電気鉄道用車両の高調波対策, 電気学会技術報告676号, p.68, 1998
- 4) 森本大観, 重枝秀紀, 中道好信：PWM変換器を含む交流き電回路の高調波特性に関する考察, 平成20年電気学会全国大会講演論文集, No.5-071, 2008
- 5) 赤木雅陽, 森本大観：実測による交流き電回路の高調波電圧共振モデルの検証, 平成29年電気学会全国大会講演論文集, No.5-193, 2017