

電力変換装置を用いた高電圧直流き電方式による 損失低減効果

重枝 秀紀* 森本 大観*

Feeding-loss Reduction by Higher-voltage DC Feeding System adopting DC-to-DC Converters

Hidenori SHIGEEDA Hiroaki MORIMOTO

A feeding loss and a voltage drop often cause problems in DC feeding system, which is relatively lower-voltage and higher-current system in comparison with AC feeding system. It is difficult to raise a feeding voltage of existing DC lines due to the costs of both dual-voltage vehicles and infrastructures although higher voltage is effective in solving such problems. Therefore, the authors investigated another DC feeding system with a focus on feeding-loss reduction. This system consists of higher-voltage feeders and DC-to-DC converters in addition to the existing feeding circuit and makes it possible to feed vehicles with conventional-voltage power. This paper reports the effect of feeding-loss reduction and other expected benefits brought by this system.

キーワード：直流き電方式，高電圧化，き電損失，電力変換装置，変換効率

1. はじめに

直流き電方式は、交流き電方式と比較して相対的に低電圧のシステムであり、特に電気車においては車載の変圧器や整流器が不要、絶縁が容易といった点で交流電気車よりも低コストであることから、通勤需要のような短距離・高密度の路線に適しているとされる。その反面、大電流のシステムであるため、電車線やレールの抵抗によるジュール損、いわゆるき電損失が大きい、電圧降下大きい等の課題があり、適切な電圧・電流を維持するために必要な変電所等の地上設備は交流き電方式より多くなる。直流き電方式の省エネルギー化の観点では、現状 1500V 以下であるき電電圧を高電圧化することが望ましく、従来は特に海外で実績のある 3000V 化を中心に検討が行われているが¹⁾、電気車・地上設備双方のコスト増や電圧切替等の課題があり、国内での導入には至っていないのが実情である。

一方、交流き電方式では単巻変圧器(AT)を利用して電車線～レール間の電圧を変えずに変電所の送出電圧を高電圧化するATき電方式が実用化されている。直流き電方式においても、ATの代わりに直流-直流電力変換装置(以下、単に電力変換装置という)を用いることで同様の構成は可能であり、電圧降下対策を主な目的として検討された例もある²⁾。この電力変換装置を用いた直流き電方式(以下、高電圧直流き電方式という)を導入することによって、電気車への供給電圧を変えずに高電圧化の様々な効果を楽しむことができる可能性がある。

* 電力技術研究部 き電研究室

本稿は、高電圧直流き電方式を対象として、主に省エネルギーの観点から次の3点について検討を行ったものである。

- (1) 高電圧直流き電方式の回路構成に関する検討
- (2) 高電圧直流き電方式のき電損失に関する検討
- (3) 高電圧直流き電方式の実用化に向けた考察

以下、各項目の概要と得られた成果について報告する。

2. 高電圧直流き電方式の回路構成

2.1 極性に関する検討

本稿では、電気車への供給電圧が標準 1500V であるシステムを対象とし、変電所の送出電圧はその2倍の3000V以上とすることを目標とする。この前提を基に考えられる高電圧直流き電方式の回路構成を図1に示す。いずれの構成も変電所の送出電圧を3000Vとした場合に相当する。

(a) の正き電方式は、従来のき電方式に対して正極性の高電圧き電線を追加したものであり、高電圧き電線の電圧は全方式の中で最大となるが、高電圧き電線が地絡した場合の故障電流は従来どおりレールが帰路となる。

(b) の負き電方式は、同様に負極性の高電圧き電線を追加したものであり、高電圧き電線の電圧は全方式の中で最小となるが、高電圧き電線が地絡した場合の故障電流は従来と異なりレールから大地に流出する経路となる。

(c) の両き電方式は、正極性・負極性両方の高電圧き電線を追加したものであり、電力変換装置を含めた構成は全方式の中で最も複雑となる。

特集：電力技術

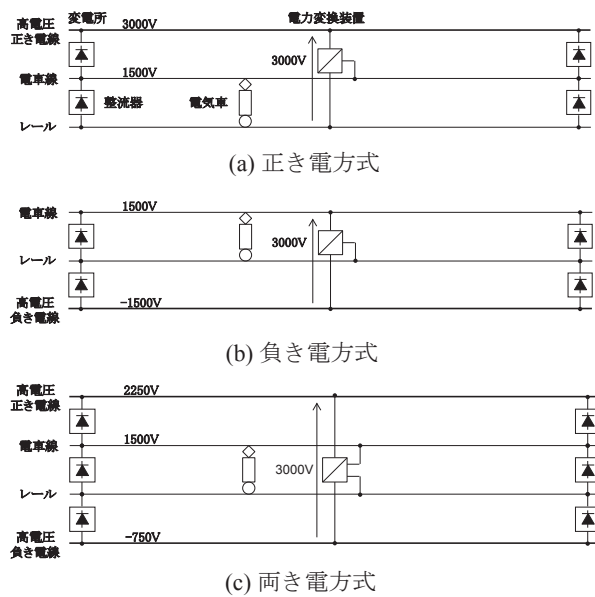


図1 高電圧直流き電方式の回路構成（極性別）

以上の3方式において、(b)は地絡故障時の保護についてより多くの検討を要すること、(c)は電線数が多くなりコストや保全の面で不利であることから、以下では(a)の正き電方式を対象として検討を進める。

2.2 高電圧電源に関する検討

正き電方式について、変電所の高電圧電源に関する回路構成を図2に示す。(a)は、変電所に高電圧用の整流器を追加するだけの最も簡素な構成であるが、シリコン整流器を前提とすると、負荷電流に応じて電車線と高電圧き電線の両方の電圧が変動し、き電損失を最小化するための電力変換装置の制御が困難となる。このため、本方式では電圧制御が可能な整流器の導入が前提となる。

(b)は、電車線電圧を高電圧に昇圧する電力変換装置を変電所に設置するものである。電車線電圧は負荷電流に応じて変動するが、高電圧き電線の電圧は制御可能であり、変電所装置と中間装置との連携が可能である。また、本方式では電力変換装置が停止した場合でも電気車へのき電が可能である。

(c)は、高電圧専用の整流器と高電圧を電車線電圧に降圧する電力変換装置を設置するものである。電車線電圧が可制御であり、同様に変電所装置と中間装置との連携が可能である。(c)の構成では電力変換装置停止時に電気車へのき電は不可能となるが、図3のような構成にすれば、回路を切り替えることで電気車へのき電が可能となる。

以上の3方式の内、電圧制御が容易な(b)の昇圧方式と(c)の降圧方式について後述するき電損失の検討を行った。結果として降圧方式の方が損失低減効果は大きかったが、両者に大差はないことから、本稿では従

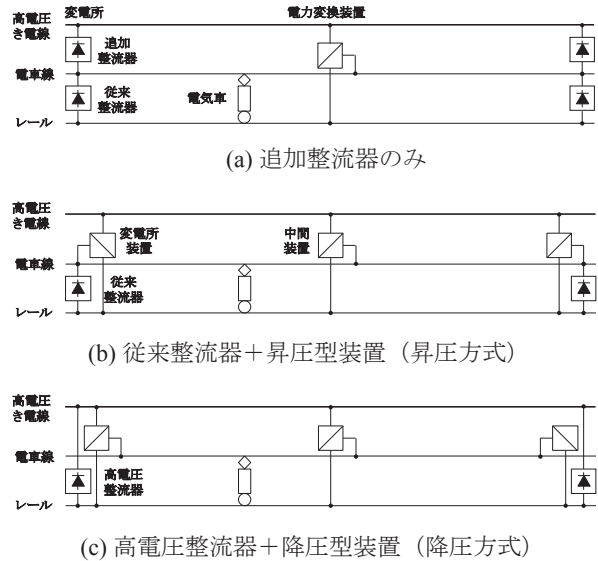


図2 高電圧直流き電方式の回路構成（電源別）

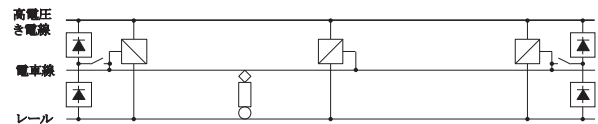


図3 降圧方式の回路構成例

来整流器のみで構成可能な昇圧方式の検討結果を紹介する。

3. 高電圧直流き電方式のき電損失

3.1 検討条件

き電損失の基礎検討として図2に示す2変電所、1電気車のモデルを対象として、電気車が一定電力を消費しながら変電所間を移動する際のき電損失を定常解析シミュレーションにより0.25km刻みで求めた。また、従来き電方式（き電電圧1500Vと3000Vの2通り）のき電損失との比較を行った。検討条件を表1に示す。

変電所の電力変換装置は、高電圧き電線の電圧を一定に制御する前提とした。中間の電力変換装置は、電気車が移動する毎にき電損失が最小となる出力電圧を探索して設定した。

3.2 き電損失の検討結果

変電所間隔が4kmの場合のき電損失を図4に、8kmの場合のき電損失を図5に示す。各図には、比較のため従来き電方式(1500Vと3000V)のき電損失も示す。また、各方式のき電損失を全区間で平均した値と、従来き電方式(1500V)を基準とする割合も示している。き電損失は電線路（電車線、レール、高電圧き電線）のジュール損のみを表し、整流器や電力変換装置の損失は含まない。

従来き電方式では、き電損失は電圧の2乗に反比例し、

表1 き電損失の検討条件

変電所整流器	定電圧源+等価内部抵抗モデル 従来整流器：1500V, 3000V (従来き電方式のみ) 高電圧整流器：3000V, 6000V, 9000V の3通り 等価内部抵抗：電圧変動率 8% 相当	
変電所装置	低電圧側電力=高電圧側電力の理想変換装置 (変換損失は考慮しない) 高電圧き電線の電圧を一定に制御 (昇圧方式)	
高電圧き電線電圧	3000V, 6000V, 9000V の3通り	
変電所間隔 x	4km, 8km の2通り	
中間装置	回路モデル	変電所装置と同じ理想変換装置 き電損失が最小となるように制御
	設置位置	① $x/2$ [km] 地点の1箇所 ② $x/4, x/2, 3x/4$ [km] 地点の3箇所
電気車負荷	4500kW の定電力源	
線路定数	電車線	0.024Ω/km
	レール	0.017Ω/km
	高電圧き電線	0.056Ω/km

1500V から 3000V に高電圧化した場合の損失は 1/4 となる。ただし、本検討では電気車を定電力源としており、パンタ点電圧に応じて負荷電流が変化する結果として、き電損失は 1/4 より小さくなる。

高電圧直流き電方式では、負荷電流の一部が高電圧系を經由することによりき電損失が低減し、その効果は、

電力変換装置の位置に電気車がある場合に最大となる。一方、電力変換装置の中間に電気車がある場合は 1500V 系の電車線とレールにも相応の負荷電流が流れ、き電損失は増大する。結果として、3000V の高電圧直流き電方式は 1500V の従来き電方式と比較して損失低減効果があるが、従来き電方式を 3000V に高電圧化した場合の

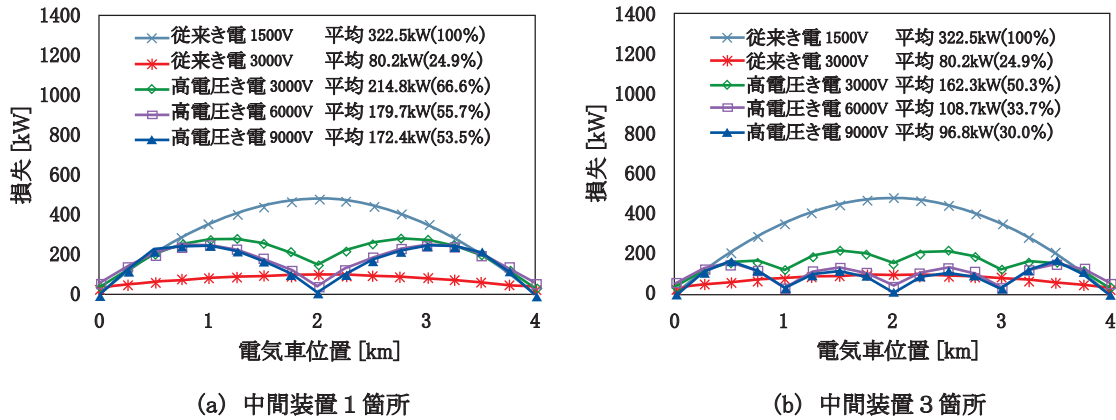


図4 き電損失 (変電所間隔 4km)

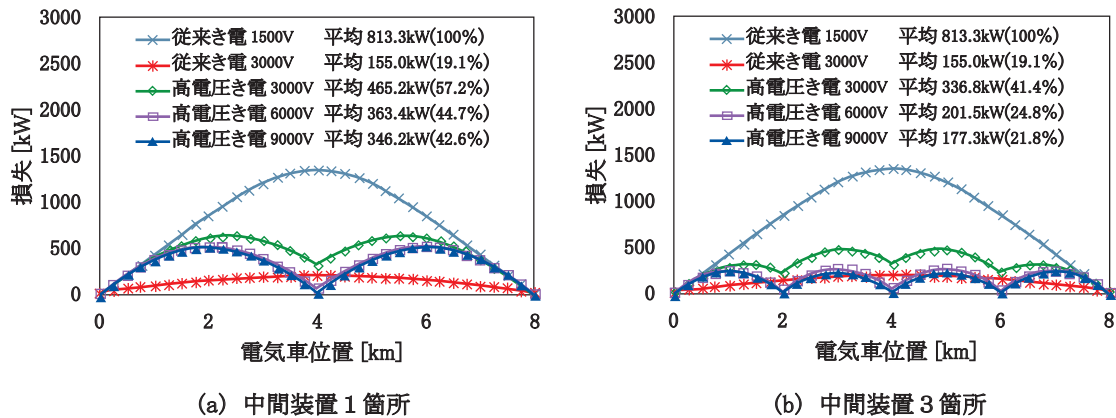


図5 き電損失 (変電所間隔 8km)

特集：電力技術

損失低減効果には及ばない。ただし、中間装置の設置数を増やすことで、損失低減効果を向上することは可能である。

また、高電圧系の電圧を3000Vより高くすることでも、損失低減効果は上昇する。ただし、3000Vから6000Vに昇圧する効果に比べ、6000Vから9000Vに昇圧する効果は小さい。これは、電車線とレールで発生する損失に対して高電圧き電線で発生する損失の占める割合が小さく、高電圧化による電線の損失低減効果が相対的に低下することによる。すなわち、高電圧直流き電方式では高電圧化による損失低減と絶縁強化のための設備投資を勘案して、高電圧系の電圧を適切に選択する必要がある。

変電所間隔8kmにおいて中間装置3箇所の場合、または中間装置1箇所かつ高電圧系の電圧が6000V以上の場合、き電損失の平均値は変電所間隔4kmの1500V従来き電方式と同等となる。したがって、き電損失の面では高電圧直流き電方式によって損失を増やすことなく変電所間隔の延伸を図ることが可能であるといえる。

3.3 変換損失を含めた検討結果

前節では電線路の損失のみの比較を行ったが、実際に

は整流器や電力変換装置における変換損失を考慮する必要がある。本節では、トータルで省エネルギーとなるために必要な装置の変換効率について検討する。

図4、図5の各ケースについて、1500V従来き電方式と高電圧直流き電方式における整流器と電力変換装置各々の出力電力平均値を計算し、電力変換装置の変換効率をパラメータとしてき電回路全体の平均消費電力を計算した結果を図6、図7に示す。整流器の変換効率は98%と仮定した。1500V従来き電方式より省エネルギーとするために必要な電力変換装置の変換効率は、変電所間隔が4kmの場合で98%以上、同じく8kmの場合で92%以上となり、変電所間隔が短くなるほど高効率の電力変換装置が必要となる。一方、高電圧系の電圧および中間装置数による必要変換効率の差は小さい。

省エネルギー化に必要な変換効率を満足していれば、高電圧系の電圧が高いほど全消費電力は低減する傾向となるが、6000Vと9000Vとの差はわずかである。

4. 実用化に向けた考察

4.1 高電圧化による効果

直流き電方式を高電圧化した場合の地上設備に関する

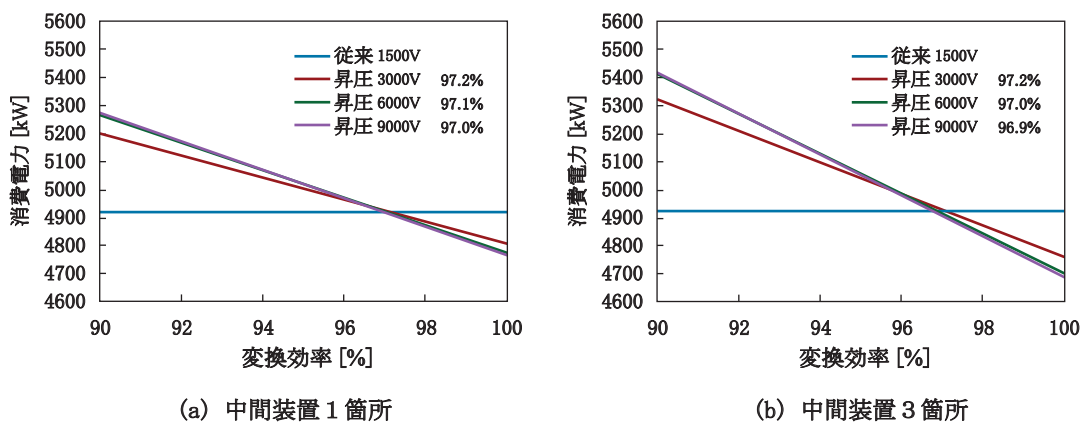


図6 き電回路の平均消費電力（変電所間隔4km）

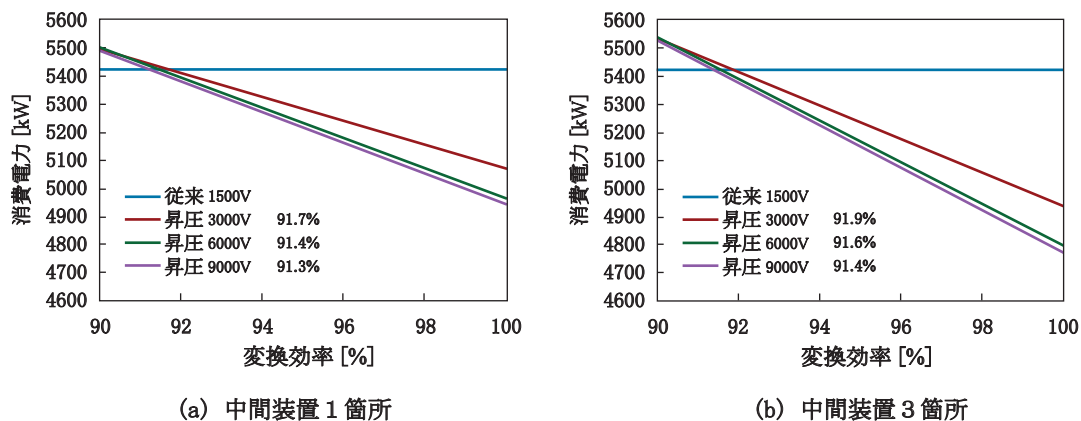


図7 き電回路の平均消費電力（変電所間隔8km）

効果として、一般に次の項目が挙げられる³⁾。

- (1) き電損失の低減
- (2) 回生効率の向上
- (3) 保安度の向上
- (4) 変電所数の削減
- (5) トロリ線の摩耗減少

ここでは、本稿で対象とする高電圧直流き電方式について、これらの効果の有無および各効果について比較検証すべき他の方式を整理する。

4.1.1 き電損失の低減

3章で述べたとおり、要求される電力変換装置の変換効率を実現できれば、き電損失の低減が可能である。

比較すべき他の方式としては、変電所増設、従来き電方式の高電圧化、変電所補完装置、超電導き電ケーブルが挙げられる。また、複線以上の路線であれば上下一括き電方式、上下タイき電方式も対象となる。

4.1.2 回生効率の向上

従来き電方式を高電圧化する場合、回生車両から遠方の力行車両に回生エネルギーを供給できる距離は電圧比の2乗で拡大するため、回生効率が向上するとされる。高電圧直流き電方式では、昇降圧チョップのような双方向の電力変換装置を導入すれば回生エネルギーを遠方の力行車両に供給することが可能であり、同様に回生効率の向上が期待される。

比較すべき他の方式としては、従来き電方式の高電圧化、サイリスタ整流器・き電電圧補償装置等の電圧可制御装置、電力貯蔵装置、超電導き電ケーブルが挙げられる。また、複線以上の路線であれば上下一括き電方式、上下タイき電方式も対象となる。

4.1.3 保安度の向上

従来き電方式を高電圧化する場合、負荷電流が減少する結果として故障電流の検出感度が向上し、故障時の保護が容易になるとされる。高電圧直流き電方式では電気車電流は従来どおりであり、2変電所間に1電気車といっ

た低輸送密度の路線では保安度の向上は期待できないが、高輸送密度の路線であれば変電所から供給する電流ピークが減少し、直流高速度遮断器やき電線故障選択継電器(50F)の整定を下げられる可能性がある。

比較すべき他の方式としては、変電所増設、従来き電方式の高電圧化、変電所補完装置、超電導き電ケーブルが挙げられる。

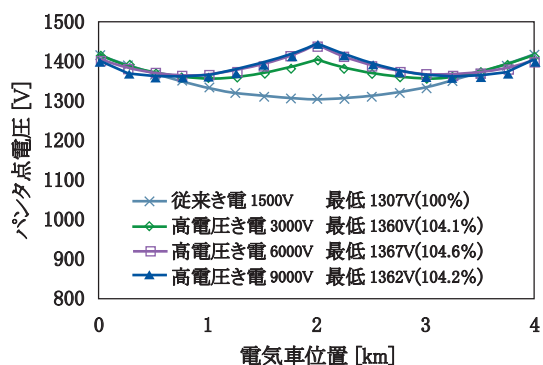
4.1.4 変電所数の削減

一般に、直流き電方式の変電所間隔は電圧降下と電食(レール漏れ電流)を考慮して決定される。従来き電方式を高電圧化する場合、電圧降下の面では低輸送密度の路線ならば変電所間隔は電圧比の2乗倍まで拡大可能であり、電食の面では電圧比の平方根倍まで拡大可能とされる。高電圧直流き電方式について、3章の検討において電気車のパンタ点電圧を計算した結果の一例を図8に示す。図8はき電損失最小化を優先した結果であるが、変電所間隔を拡大した場合でも拡大前の従来き電方式と同等のパンタ点電圧を確保することが可能である。また、レール対地電圧を計算した結果の一例を図9に示す。従来き電方式と比較してレール対地電圧が正極性となる部分の面積が減少しており、レール漏れ電流が減少することを示している。したがって、電食の面からも変電所間隔の拡大は可能であるといえる。本方式では、変電所間に中間装置を設置する必要があるが、電力会社系統からの受電は不要であり、変電所より省スペースになるものと期待される。

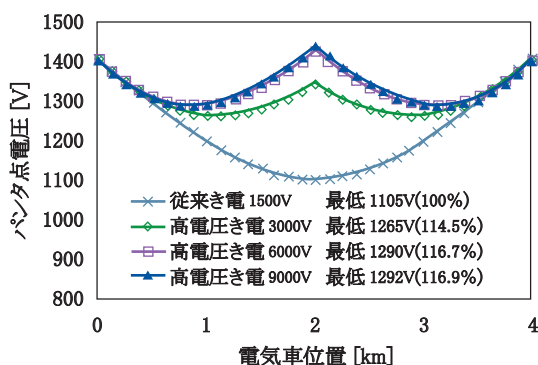
比較すべき他の方式としては、従来き電方式の高電圧化、変電所補完装置、電力貯蔵装置、超電導き電ケーブルが挙げられる。

4.1.5 トロリ線の摩耗減少

従来き電方式を高電圧化する場合、電気車の集電電流が減少することでトロリ線の電氣的摩耗が減少するとされる。高電圧直流き電方式では、電気車電流は従来どおりであり、効果は期待できない。



(a) 変電所間隔4km



(b) 変電所間隔8km

図8 パンタ点電圧の計算例(中間装置1箇所)

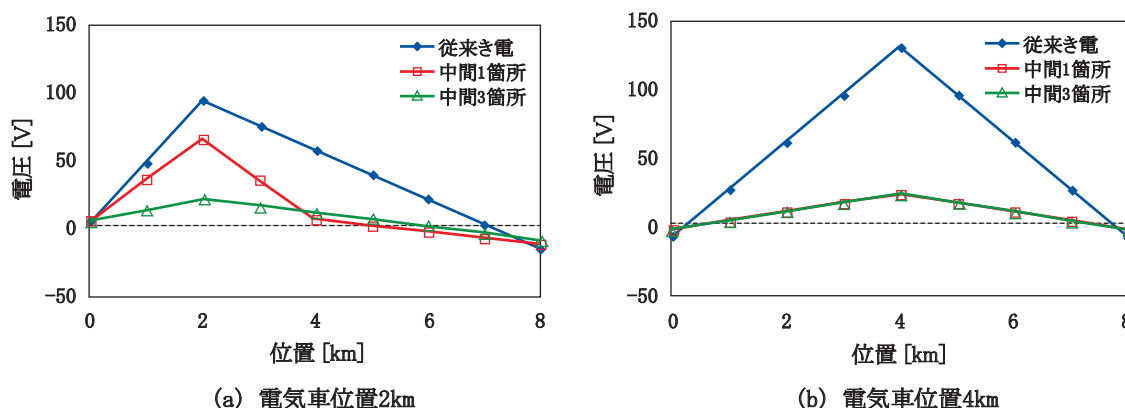


図9 レール対地電圧の計算例（変電所間隔 8km）

4.2 実用化に向けた技術課題

高電圧直流き電方式の特徴を次に要約する。

- ・ 電気車への供給電圧を変えることなく、き電損失の低減、回生効率の向上、変電所数の削減といった高電圧化の効果が得られる。
- ・ 電力変換装置は受電設備が不要であり、変電所より省スペースとなる。
- ・ 高電圧き電線を新たに敷設する必要がある。
- ・ き電損失低減を実現するためには高効率の電力変換装置が必要となる。

本方式の実用化に向けて、これらの得失をより定量的に評価する上で必要と考えられる技術開発課題を示す。

- ・ 実際の列車運行に対する省エネルギー効果の検証が可能な運転電力シミュレータの開発
- ・ シミュレータを用いた電力変換装置制御手法の開発
- ・ 電力変換装置の保護（故障モード、故障検出手法、保護手法等）の開発
- ・ 高電圧系の絶縁協調（電路の絶縁手法・異常電圧保護・地絡時の大地電圧上昇等）の検討
- ・ 電力変換装置の高性能化（変換効率向上、電力貯蔵装置等との連携）

本稿では、き電損失の最小化を目的とした検討を行った。この場合、電力変換装置は電気車が直下に存在する場合に電気車負荷の大部分を出力する必要があり、大容量の装置が必要となる。しかしながら、装置容量を電気車負荷の 1/2 程度とした場合でもき電損失の低減が可能となる可能性があり、実用化においては上記課題の検討とあわせてシステムの最適化を図る必要がある。

5. まとめ

本稿では、主に直流き電方式の省エネルギー化の観点

から、提案する高電圧直流き電方式について基本的な特性をシミュレーションによって検証した。得られた成果を次に要約する。

- (1) 高電圧直流き電方式の回路構成について、高電圧き電線の極性によって正き電方式、負き電方式、両き電方式が考えられる。また、高電圧電源によって追加整流器のみ、昇圧方式、降圧方式が考えられる。
- (2) 高電圧直流き電方式のき電損失について、従来き電方式より低損失となる可能性があること、高電圧系の電圧には適切なレベルがあることを明らかにした。また、低損失とするために必要な電力変換装置の変換効率を検討し、変電所間隔が短いほど高効率の装置が必要となることを示した。
- (3) 高電圧直流き電方式の適用効果について検討を行い、き電損失低減のほか、回生効率の向上、変電所数の削減等の効果が見込まれることを示した。また、実用化に向けた技術課題を整理した。

今後、運転電力シミュレータ等の環境を整備した上で、本方式の導入効果や電力変換装置の制御手法等に関してより具体的な研究開発を進めていきたい。

文献

- 1) 高電圧直流電化方式調査専門委員会編：直流電気鉄道の高電圧化の調査報告，電気学会技術報告第Ⅱ－295号，電気学会，1989
- 2) Ladoux, P : Une nouvelle structure d' alimentation des catenaires 1500V: le systeme 2x1500V, Revue Generale des Chemins de Fer, pp.21-31, 2006.
- 3) 伊藤二郎，伊東利勝：高電圧直流電気鉄道の効果，電気学会交通・電気鉄道研究会，TER-93-9，1993