Closing Surge and Surge Propagation at Shinkansen Changeover Section

Hitoshi Hayashiya Member (JR East, h-hayashiya@jreast.co.jp)

Koji Ajiki Member (Railway technology research institute, ajiki@rtri.or.jp)

Keywords: electric railway, Shinkansen, changeover switch, changeover section, closing surge

In some substations of Shinkansen power system, there are a few reports of unusual conditions caused by the action of the changeover section. In Shin-Tabata substation, for example, the lightning arrester acts frequently and it becomes slight anxiety for daily maintenance. Through our investigation, it was clarified that the phenomena are caused by the closing surge of the vacuum switchgear without the train load. We have reported about the outline of the phenomena previously (in IPEC-Niigata 2005). In this paper, the detail of the phenomena are described and the propagation of the surge voltage on the railway transmission line and the reflection at the open end of the changeover section are apparently confirmed through both the field measurement and the computer simulation. The study of the phenomena removes the anxiety on the maintenance and leads to the more reliable Shinkansen power system.

Figure 1 shows the relation among the instantaneous voltage of the power source when the switchgear is opened and closed and the over-voltage. The amplitude of the over-voltage strongly depends on the opening and closing phase. Figure 2 shows the example of

Fig. 1. Relation among the instantaneous voltage of the power source when the switchgear is opened and closed and the over-voltage

Fig. 2. Example of the voltage change of changeover section just after the closing of the switchgear without load (left figure is zoomed waveform of the right figure)

the voltage change of changeover section just after the closing of the switchgear without load. The strong over-voltage is always observed 38 micro second after the closing of the switchgear. Such a delay of the peak over-voltage is theoretically explained in connection with the surge propagation and reflection at open end. Figure 3 shows the results of the surge impedance measurement. It is also confirmed that the reflection voltage comes back to the substation 38 micro second after the injection of the impulse voltage to the power system. The measurement results of the arrester discharge current is consistent with this hypothesis.

Figure 4 shows the simulation results of the surge propagation at changeover section. The round trip of the surge voltage at changeover section is observed. It is also discovered that the rudder shape of the electric circuit of the contact wire and the messenger line which put up the contact wire causes the distortion of the wave-front waveform.

As a general concept, the location of the changeover section strongly influences on the surge propagation phenomena and causes the frequent action of the lightning arrester. Such information will be instructive for future design of the reliable Shinkansen power system structure.

Fig. 3. Response of the changeover section circuit for injected impulse voltage

Fig. 4. Simulation results

新幹線切替セクションにおける無負荷投入過電圧とサージ伝搬

正 員 林屋 均* 正 員 安喰 浩司**

Closing Surge and Surge Propagation at SHINKANSEN Changeover Section

Hitoshi Hayashiya*, Member, Koji Ajiki**, Member

In some substations and sectioning posts of Shinkansen power system in JR East area, the electrical transient phenomena when the Shinkansen train passes through the changeover section are reported during the last a few years. In this paper, the closing surge phenomena of the Shinkansen changeover section are elucidated based on both the detail measurement of the surge phenomena at substations and computer simulation. It is clarified that the surge propagation and the reflection at open end of the contact wire system cause the over-voltage at changeover section and result in the discharge of the lightning arresters at some substations.

キーワード：電気鉄道，新幹線，切替開閉器，切替セクション，投入過電圧，サージ伝搬

Keywords: electric railway, shinkansen, changeover switch, changeover section, closing surge, surge propagation

1. はじめに

新幹線き電システムでは，変電所で三相交流を位相が90度異なる二回線の単相交流に変換し，これを列車に供給している。この際，列車に電気を供給する電源を300msの瞬停を伴って瞬時に切り替える切替セクションと呼ばれる設備が数10km間隔で設備されている。切替セクションでは，真空開閉器を用いて電源を瞬時的に切り替える動作が列車の通過毎に繰り返されており，そのたびに電氣的な過渡現象が発生している。このような切替セクションに関しては，大きな事故には至らないものの，保守の立場からすると気になる事象が各方面で発生しており，JR東日本では研究開発センターと各支社の現業機関と協力して，現象の包括的な把握と解明を行ってきた。

本論文では，これらの検討の中から，切替セクションにおける過電圧発生メカニズムについて詳細に検証した成果を報告する。このような事象は，例えば東北新幹線新田端変電所において避雷器の多頻度動作をもたらしており，設備保守上の懸案事項となっている。切替セクションにおける異常現象としては，これまでに鉄道総研が中心となって報告した開閉器の負荷投入時の高周波再発弧現象⁽¹⁾がある

が，今回の調査の結果，これとは異なる真空開閉器の無負荷投入時にも過電圧が発生し，これが避雷器の多頻度動作をもたらしていること，その背景には切替セクションにおけるサージ伝搬現象があること，セクション配置や架線構成がその現象に大きく寄与することなどがフィールドにおける測定やき電システムの過渡現象シミュレーションにより明らかとなった。切替セクションにおける無負荷投入過電圧現象の概要については，既に文献(1)にて報告したが，本論文ではその原因についてき電システムにおける進行波の伝搬現象を明確に捕らえる測定データに基づき，現象論を詳細にまとめた。無負荷投入時にもある程度の過電圧が発生することはこれまでもおよそ認知されていたが，その現象を切替セクションにおける進行波の伝搬と絡めて厳密に検討・報告した事例はこれまでになく，実測・シミュレーションの両面から詳細に現象を説明することが出来た。

まず第2章では新幹線き電システムおよび切替セクションの概要についてまとめ，これまでの研究例などについて紹介する。第3章では無負荷投入過電圧の発生状況を実測した結果について，第4章では検討に資するために行ったサージインピーダンス測定試験結果についてまとめる。第5章では，これらの検証を裏付けるために行ったき電システム過渡現象シミュレーション結果について述べる。

2. 切替セクションと過電圧現象

〈2・1〉 切替セクション 単相交流を電源とする新幹線のき電システムでは，変電所において電力会社から受電した三相交流を，スコット変圧器もしくは変形ウッドブリッジ変圧器を用いて位相が90度異なる二回線の単相交流に

* 東日本旅客鉄道（株）JR 東日本研究開発センター
〒331-8513 さいたま市北区日進町 2-0

Technical Center, R&D Center of JR East Group
2-0, Nisshin, Kita-ku, Saitama 331-8513

** 財団法人鉄道総合技術研究所電力技術研究部
〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38

Power Supply Technology Division, RTRI
2-89-38, Hikari-cho, Kokubunji 185-8540

変換して列車に電気を供給している。このような変電所は、JR 東日本管内の東北・上越・長野新幹線では 30～60 km 毎に設備されており、変電所箇所では列車が位相の異なる電源間を移動するために、切替セクションと呼ばれる設備が設けられている。また、変電所と変電所の中間部では、異電源の突き合わせとなるため、同様に切替セクションが設けられている。

切替セクションの構成概要を図 1 に示す。約 1 km に渡る切替セクション部に列車が進入したことを軌道回路で検出し、①開閉器 (VCB) A を開放、②約 300 ms 後に開閉器 B を投入、により列車に供給される電力が図 1 の場合では M 座から T 座に切り替えられる。ここで M 座、T 座とはスコット変圧器により三相交流から変換された二回線の単相交流で、位相が 90 度異なっている。さらに列車通過後には次の列車に備えるため、列車が切替セクションから脱出したことを同じく軌道回路により検出すると、③開閉器 B を開放、④約 300 ms 後に開閉器 A を投入、の手続きを行う。このように、列車の通過に伴い、真空開閉器の開閉動作により四回のき電回路構成の変更を行う。

〈2・2〉 これまでの検討事例 このように電気的な過渡現象に多頻度でさらされる切替セクションにおいては、これまでも幾つかの技術革新が行われてきている。

持永らは、新幹線切替セクションへの真空開閉器の導入以来発生していた 0 系新幹線車両の主変圧器故障について、切替開閉器投入時に車両主変圧器と真空開閉器による高周波再発弧振動現象が発生することを突き止め、その原因を解明する研究および対策の提案を行った^⑦。

安喰らは、文献(3)において車両変圧器の突流を防止するための投入制御機能を持つ静止型切替開閉器の研究を報告しており、良好な試験結果が得られており、最近では東海旅客鉄道が実用化に向けた開発を推進している^⑧。また、文献(4)においては、切替セクションにおける過渡現象に伴って発生する可能性のある開閉器の極間短絡故障について、現象解析を行うとともに新しい故障検出継電器の開発を行った。この故障検出継電器は既に実システムにおいて警報装置として水平展開されており、実用に供されている。

本論文では、文献(2)の現象と似た過電圧現象を解明し

ているが、前節で述べた切替開閉器の手順で言えば、高周波再発弧現象は②の列車通過時の負荷投入時に発生する過電圧現象であるのに対し、本論文で対象とする現象は④の列車通過後の無負荷投入過電圧現象である。

〈2・3〉 避雷器多頻度動作 1 章でも触れたように、切替セクションにおいては開閉器の開閉による過渡現象に基づくと思われる特異な事象が幾つか発生している。その一例として東北新幹線新田端変電所では、上り線および下り線において、ともに中セクションに接続された避雷器のみが、一日あたりいずれも平均 3～5 回程度、多い日には 10 回以上も動作する状況が継続している。通常の電力用避雷器では、避雷器が放電電荷量は僅かであるものの多頻度で動作する事象は見られず、また、2001 年には新田端変電所で避雷器の地絡事故が発生した経緯もあり、保守上の懸案事項となっている。

新田端変電所が他の変電所と異なる点、即ち、新田端変電所においてのみこのような現象が顕在化しうる要因を列記すると下記の通りであり、それらの原因を特定するためのフィールド測定を、他の新幹線変電所およびき電区所での測定との比較なども含めて行ってきた。

- 変電機器が GIS 化されている。これにより変電所内母線等の静電容量が大きくなると共に、架空のき電引き出し線との境界部にインピーダンスの変移点を持つ。
- 通常は変電所直近に設備される 1 km ほどの切替セクション区間が、変電所からおおよそ 3 km 離れた位置に設備されている。
- 東京方面のき電方式が通常の AT き電方式ではなく、同軸き電ケーブル方式をとっている。このため、き電回路の回路定数が特殊である。
- JR 東日本における新幹線ネットワークのボトルネックに位置するため他の変電所より列車負荷本数が多く、下り線は全ての列車が力行状態で通過すると同時に、多くの場合ターミナル駅に停車中の列車負荷を抱える。

これらのうち、今回の一連の検討の結果、二番目の切替セクションが遠方に設備されていることが避雷器動作の要因であることが解明され、これらの過程について 3 章以降にまとめる。

3. 無負荷投入過電圧現象

〈3・1〉 過電圧測定 新幹線切替セクションにおける無負荷投入過電圧の発生状況を確認するため、東北新幹線新田端変電所において、夜間の列車運行のない時間帯にき電システムを加圧し、切替セクションを動作させる随時加圧試験を行った。過電圧の測定は、切替開閉器室の中セクション導体部に高電圧プローブ (パルス電子技術: EP-150KP) を接続して行い、デジタルオシロスコープ (YOKOGAWA: DL1640L) により波形を記録した。高電圧プローブの仕様を表 1 にまとめる。

切替セクション動作時の中セクション電圧の測定波形の一例を図 2 に示す。図 3 は投入時の過電圧発生部分を拡大

図 1 切替セクションの構成

Fig. 1. Configuration of the changeover section.

表示したものであるが、この場合、絶対値にして 100kV 近い過電圧が発生している。なお、図 2、図 3 はいずれも文献(1)に掲載したものであるが、本論文の論旨を分かりやすくするために再掲載した。

図 2 において、時刻 $t = 0 \text{ ms}$ に一方の開閉器が無負荷開放され、およそ 300ms 後に他方の開閉器が無負荷投入されている。このケースでは、正のピーク値付近で開閉器が開放されたため、中セクションには 40kV 近い電圧が残留している。続いて他方の開閉器が投入されるまでの約 300ms の間は、中セクション導体は電氣的に浮いた状態となるが、加圧された近隣の回線からの静電誘導を受けるために正弦波状の電圧振動が見られるとともに、わずかな漏れ抵抗を介して電荷が放電されるために徐々に直流電位が低下していく。やがて他方の開閉器が投入されるが、このケースで

表 1 高電圧プローブの仕様

Table 1. Specifications of high voltage probe.

Maximum input voltage	DC.100kV, Pulse 145kV
Input resistance	1500Mohm
Input capacity	About 10pF
Voltage divider ratio	5000:1 $\pm 3\%$
Frequency obi stage	DC $\sim$ 50MHz
Rise time	Less than 10ns

図 2 切替セクション動作時の中セクション電圧

Fig. 2. Voltage waveform with a transient over-voltage during the sequential switching.

図 3 無負荷投入過電圧部分の拡大図

Fig. 3. Zoomed waveform of the wave-front in Fig. 2.

はたまたま負のピークに近い位相での投入となったため、その後の過渡現象で大きな過電圧が発生したと考えることができる。

図 4 は横軸に開閉器開放時の開放元電源の瞬時電圧、縦軸に投入時の投入先電源の瞬時電圧としてその直後に発生した過電圧ピーク値の絶対値に直径が比例した円を描いたグラフである。50 回の試番中、90kV 以上の過電圧を示した四回については特に過電圧値を図中に記した。図に示すように、開放、投入の位相のタイミングは制御されていないため、試験ごとに、あるいは列車通過ごとに発生する過渡現象はまちまちであるが、図中、右下および左上の領域で大きな過電圧が発生していることが分かる。すなわち、正弦波形のピーク値付近で開閉器が開放されて、その逆位相で投入された場合に絶対値が 90kV を超える過電圧が発生していることが分かる。

〈3・2〉 過電圧波形の考察 過電圧発生時の詳細な過渡現象を見ると図 3 より、新田端変電所での投入時の過電圧現象においては、一度階段状に電圧が跳躍した後、 $20\mu\text{s}$ ほどその電圧が維持され、その後電圧が下降（電圧の絶対値が上昇）を開始し、最初の跳躍からおおよそ $40\mu\text{s}$ 後に過電圧のピークを迎えることが分かる。L と C の直列の集中定数回路を仮定して、スイッチ投入の過渡現象を解析すれば、そのときの過渡波形は (1) 式で表現される。

$$V = A \sin\left(\frac{t}{\sqrt{LC}} + \phi\right) + \frac{E}{1 - \omega^2 LC} \sin(\omega t + \theta) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、A および ϕ は初期条件から求まる定数、 ω , θ は電源角周波数および位相、L, C は回路定数である。

この式において、第二項より理論的には正弦波高値の 3 倍近い過渡過電圧が発生することが予想されるが、図 3 の波形を考察すると、この現象はより厳密には分布定数回路における進行波の伝搬波形であると解釈すべきである。すなわち、

① 開閉器の閉極に伴い極間の電界が徐々に強まり、真空

図 4 開閉器開放・投入時の電源電圧と発生過電圧の関係

Fig. 4. Relation among the instantaneous voltage of the power source when the switchgear is opened and closed and the over-voltage.

遮断器の接点電極上の弱点箇所では絶縁破壊し、先行放電が発生する（文献(7)によれば、真空中の絶縁破壊電圧は電極材料にも大きく依存するが1 cmあたり70 kV程度、実際には材料の工夫によりもう少し絶縁耐力があるものと考えられる）。架空導体数 kmの中セクションの静電容量は極めて微小であるために、瞬時に中セクションは充電され、中セクションの電位は電源電位と同等になり、極間の電界は消滅する。

- ② 電界消滅後は、開閉器周辺の漂遊容量やインダクタンスからなる共振回路を電流が導通しつづけようとするが、優れた消弧能力をもつ真空開閉器により電流零点で先行放電は消弧、中セクションは電氣的に浮いた状態となる。
- ③ 先行放電により中セクション導体に伝えられた電荷は進行波を形成し光速に近い速さで中セクションの導体を伝搬し、中セクション端部に到達する。中セクション端部は電氣的には開放端であるため、正の反射をする。
- ④ 切替セクションの設備状況により数 μ から数十 μ s 後に架線導体を伝搬してきた正の反射波は再び開閉器部に到達し、中セクション導体に通常の波高値の倍以上の過電圧をもたらす。ただし、変電所やき電区分所には避雷器が設備されているため、その制限電圧により過電圧の絶対値は90~100 kVに抑制される。この際、避雷器が放電を伴う。

以下、これらを裏付ける測定結果についてまとめる。

〈3・3〉 先行放電による中セクションの充電 図5は図2および図3に示した無負荷投入過電圧発生時の波形を投入先電源の1周期(20 ms)分と重複させて描画したものである。投入前の中セクション導体電位は開放時の電荷が残留しているためにおよそ+20 kV（開放瞬時は40 kVであるが、300 msの間に減衰している）であるが、 $t = 292.17$ msに電圧が跳躍した瞬間、投入先の電源の電位は34.1 kVである。図3より、この電圧値は跳躍後20 μ s継続する電位と等しく、この間、開閉器の極間電位は消滅していることになる（図中、○印で示した部分が図3で電圧が階段状に変化した後に電圧が平坦に維持されている時間帯である）。

その後、20 μ s程度経過すると、中セクション電位はさらに下降（絶対値は上昇）を開始するが、その時点では既に先行放電は消滅しているため、中セクション電位と投入先電源電位は乖離してゆき、再び極間電位差が生じる。その間も開閉器は投入過程であるために電極間隔は1 msに0.5 mm程度ずつ狭まっており、それにつれて電界強度も高まり、再び先行放電が発生する。この繰り返しにより、断続的に階段状の電位の変化が生じた後、やがて接点同士が機械的に接触して、中セクションの電位が投入先電源電位と完全に一致する。

なお、図5で $t = 300$ ms前後で再び大きな電位の乖離が見られるが、これは投入過程において一度接触した接点が機械的にバウンドする、いわゆるチャタリングが生じている時間帯と一致し、この間にも先行放電の消弧、発生に伴

図5 中セクション電位と投入先電位の比較

Fig. 5. Voltage of the changeover section comparison with that of the connected power source.

図6 切替セクション設備の配置

Fig. 6. Location of the changeover section.

う微小な過電圧が発生する可能性があることが確認できる。

〈3・4〉 過電圧の伝搬 図6(a)は避雷器の多頻度動作が見られる新田端変電所における変電所、および切替セクション設備の位置関係を示したものである。通常は同図(b)に示す上越新幹線新高崎き電区分所の例のように変電所直近に切替セクションが設備されるが、新田端変電所では変電所から3 kmほど大宮方面にずれた位置に切替セクションが設備されている。なお、このような変則的な設備配置となっているのは歴史的経緯によるものであると思われるが、現段階では明確な理由は見当たらない。

図6(a)に示したように、新田端変電所においては切替セクション開放端までの変電所からの距離は3 km少々である。この距離を過電圧が光速に近い速度(300 m/ μ s)で伝搬する進行波となって進んだとすれば、開放端へはおよそ10 μ s後に到達し、20 μ s後には再び変電所位置に戻ることになり、図3の電圧上昇開始時間と一致する。このようなサージ電圧の伝搬及び開放端での反射現象が過電圧の発生と関連していることは、4章で述べるサージインピーダンス測定においても確認される。また、反射波の波頭が変歪し、過電圧のピークが約38 μ s後に到達する点については、5章のき電系統過渡現象シミュレーションにおいて

図 7 避雷器放電電流波形

Fig. 7. Waveforms of the arrester discharge current.

論じる。

〈3・5〉 避雷器放電電流波形との比較 図 7 は新田端変電所スキ電線引出し部に設備された避雷器の接地線放電電流の実測波形である。電流波形の測定には高周波応答に優れたピアソン社製 CT (model 325: 使用可能立ち上がり時間 30 ns) を使用した。図 7 も図 2, 図 3 同様に既に文献(1)で過電圧状況として報告した結果であるが、現象論の把握のために重要であるため、再掲載した(同時の測定ではないため、時間軸は図 2, 図 3 と共通ではない点に注意)。凡例中, LA11T は新田端変電所スキ電線のうち下り線東京方面に送電している回線に, LA13T は同じく下り線大宮方面に送電している回線に, LA11SN1 は下り線中セクションに送電している回線に取り付けられた避雷器の接地線電流波形を意味する。このように、放電電流は中セクション回線においてのみ計測されており、このことは、過電圧発生の瞬間には、中セクションが東京方面および大宮方面の各回線とは電気的には接続されていないことを示唆する。前記のように、極間の電位差により先行放電が発生するが、瞬時に電荷が移動するために電位差は解消され、開閉器の閉極過程において先行放電は一旦消滅する。このため、反射波が到達して過電圧が発生する瞬間には、中セクションは浮いた状態となっていることを裏付けるものである。

図 7 の $t = 0$ ms を見ると、実電流波形ともスパイク状のノイズとも判別し難い波形が見られている。これは図 3 において先行放電が発生して階段状に中セクション電位が変動した瞬間であり、その後反射波による過電圧の絶対値の上昇が開始して若干の放電電流が計測されるとともに、最も過電圧が大きくなる $38 \sim 40 \mu\text{s}$ 後に 100 A 近い最大の放電電流が計測されており、電圧波形と電流波形で一致した現象を示している。避雷器の非線形 V-I 特性から判断しても、避雷器の制限電圧が 90 kV ~ 100 kV 程度で 100 A の放電電流が見られることが妥当であり、また、放電電流および中セクション過電圧のピーク付近で $4.5 \mu\text{s}$ 程度の周期の振動波形が重畳していることなども、電流波形と電圧波形で一致している。

〈3・6〉 稀に見られる波形の解釈 図 8 は、図 3 と同

図 8 無負荷投入過電圧の拡大波形 (稀に見られるケース)

Fig. 8. Zoomed waveform of the wave-front (rare case).

様に切替開閉器の無負荷投入時に稀に見られる中セクションの電位波形である。図 3 では投入後、周期的、かつ連続的な振動波形が継続しているのに対し、図 8 では鋸歯状の波形が見られる。これは、一連の現象論に照らして考察すると、進行波の到来に伴う過電圧絶対値の上昇過程で、再び絶縁破壊が発生し、 $t = 290.237$ ms あたりで再度階段状の電圧変化が発生する(図中 A)。放電により電極間が橋絡されたことで電荷が速やかに移動し、一旦は電位差が解消される。この際、一回目の先行放電時と同様に中セクション導体を進行波が伝搬し、二回目の階段状の電圧変化からおおよそ $20 \mu\text{s}$ 後の $t = 290.257$ ms に開放端から戻ってきた進行波が到達する(図中 B)。しかし、今度は一回目の先行放電で生じたものとは極性が逆の進行波が到達するため、それに伴い電圧の絶対値は下がる方向に変化し始めている。例えば中セクション電圧の絶対値が下がる方向であっても、電極を挟んで対向する電源の電位はこの時間オーダではほぼ一定(図 8 の場合では -35.4 kV)であるため、極間の電界は上昇してゆき、再び先行放電による階段状の電圧変化が $t = 290.263$ ms に発生している(図中 C)。それ以降、しばらくは先行放電が発生せず、図 3 の場合と同様に進行波の往復に伴う周期的な電圧変動が見られている。先行放電が発生する電界は、電極表面の微細な粗さにも左右され確率的に決定されるため、先行放電が途中で発生する場合としない場合が混在している事例である。

4. サージインピーダンス測定試験

〈4・1〉 試験回路 新幹線き電システムにおける過電圧伝搬様相を確認するため、回線に雷インパルスを入力し回路の応答を計測するサージインピーダンス測定試験を行った⁶⁾。試験回路を図 9 に示す。インパルス電源には標準雷インパルス発生装置を使用し、波高値 3 kV 程度のインパルスを入力し、 100Ω の無誘導抵抗両端での電圧測定により注入された電流値を計測し、デジタルオシロスコープ(YOKOGAWA: DL1640L)により回路の応答を記録した。本試験により、被測定回路のサージインピーダンスなど

Figure 10 is a line graph showing the voltage of the IG side (E0) and the voltage of the circuit side (E1) over time. The x-axis is Time [micro second] from -50 to 200. The y-axis is Voltage [V] from 0 to 4000. E0 is a solid line, and E1 is a dashed line. Both show a sharp rise at t=0, peaking around 3000V for E0 and 2200V for E1, followed by damped oscillations.

Fig. 10. Response of the changeover section circuit for injected impulse voltage.

$$Z = \frac{E_1}{I} = \frac{E_1}{E_0 - E_1} R \dots\dots\dots (2)$$

5. き電系統過渡現象シミュレーション

Fig. 11. Model of the transient power system simulation.

〈5・2〉 解析結果 中セクションが遠方に存在する新
 戸端変電所と、き電区分所の脇に中セクションが存在する
 新高崎き電区分所のそれぞれの場合について、図 6 中に示
 した設備配置位置に準じるように中セクション引出し線導
 体長および中セクションカテナリ部の導体長を設定して過
 渡現象解析を行った結果を図 12 および図 13 に実線で示す。
 ここで、時刻 $t = 0 \text{ ms}$ に開閉器 A が最大振幅で開放され、
 その後、 $t = 285 \text{ ms}$ に開閉器 B が逆極性の最大振幅で投入
 された事象をシミュレーションしている。開閉器投入過程
 の先行放電による電荷の移動および先行放電の消滅をモ
 デル化するため、開閉器 B は $t = 285 \text{ ms}$ に一度投入された
 後、電荷の移動が完全に終了している $2 \mu\text{s}$ 後には再び開放
 され、 1 ms 後に再び投入されるものとした（厳密に絶縁破
 壊電界などを考慮しているわけではない）。また、カテナリ
 部については図 11 に示したように、パンタグラフと直接
 接触するトロリ線と、それを吊架する硬銅捩線（メッセ
 ンジャー）の並列回路としてモデル化している。実設備では
 これらをおよそ 150 m ごとに M-T コネクタと呼ばれる架

(a) Voltage waveform of the changeover section (simulation)

(b) Zoomed waveform of (a)

図 12 解析結果（中セクション過電圧の時間変化：新田端 SS の場合）

Fig. 12. Simulation results (Waveforms of the CS potential, Shin-TABATA SS case).

図 13 解析結果（過電圧発生部の拡大図のみ）
（中セクション過電圧の時間変化：新高崎 SP の場合）

Fig. 13. Simulation results (Waveforms of the CS potential, Shin-TAKASAKI SP case).

線金具を用いて接続しており、これらには双方の電気抵抗に従った電流が分流する事になるため、図に示したような梯子形回路となる。

解析的な検討を進める過程で、メッセンジャーのモデル化を行わず、トロリ線導体のみをモデルに考慮してシミュレーションを行うと、図 3 にあるような、先行放電による階段状の電圧変動から $20\mu\text{s}$ 後から $38\mu\text{s}$ 後にかけての中セクション電位の漸増が解析結果に現れない。即ち、開放端で反射して来た進行波がおおよそ $20\mu\text{s}$ 後に到来し、一気に

図 14 解析結果（避雷器放電電流波形）

Fig. 14. Simulation Results (Waveforms of arrester discharge current).

ピーク電圧を迎える結果となる。これを、メッセンジャーを考慮して梯子型回路のモデルとすることで、図 12(b) に示したような解析結果が得られ、 $20\mu\text{s}$ 後から徐々に過電圧の絶対値が大きくなり、おおよそ $38\mu\text{s}$ 後に過電圧のピークを迎えるような、図 3 に示した実測と同様な傾向を再現することが出来た⁽⁹⁾。このことから、電車線設備の梯子形回路部を進行波が複雑に分流しつつ正の反射波が電源回路に戻ってくるために、このような波頭部が変歪した過電圧が計測されるものと考えられる。

図 12 および図 13 には、変電所および区分所における中セクション電位を実線で記したのとあわせて、中セクション開放端（変電設備から遠い方）の電位変動を破線で記した。これらより分かるように、過電圧発生後の電圧振動は、分布定数回路系を進行波が往復している現象であることが確認できる。切替セクションが変電所位置から遠方に設備されている新田端 SS の場合は、進行波の伝搬に時間を要することからその往復の周期が通常の切替セクションに比べて長周期となる。このため、過電圧の継続時間が通常よりも長くなり、避雷器の放電電荷量が大きくなり、その結果として、避雷器カウンタの動作に至っていると考えられる。図 14 は図 12 および図 13 の解析における避雷器接地線放電電流波形であるが、無負荷投入過電圧による避雷器の放電は切替セクションまでの距離によらずに発生するが、その継続時間、およびトータルの放電電荷量が異なっていることが確認できる。例えば今回の解析結果の場合、切替セクションが遠方に設備されている新田端 SS の場合は放電電荷量は 1.61 mC であるが、通常の構成である新高崎 SP の場合は 0.62 mC であった。なお、ここでの放電電流値が図 7 に比べてやや大きな値となっているが、これは避雷器の非線形特性曲線のモデル化に大きく依存するものであると考えている。

6. まとめ

新幹線切替セクションにおいて、列車通過後の真空開閉器の無負荷投入に伴って発生する過電圧現象について、進行波理論および様々な測定結果に基づいて、詳細な検討を

行った。その結果、以下のことが確認できた。

- 切替開閉器の無負荷投入過程における先行放電により発生した進行波電圧は、中セクションの架線系を伝搬し、開放端で正の反射をして戻ってくることににより、変電所中セクション箇所にも過渡的な過電圧をもたらしており、新田端変電所における避雷器の多頻度動作は、このような進行波による過電圧が原因である。
- 一般論に展開すると、新田端変電所のように切替セクションが変電所から遠方に設備されている変電所では、進行波の往復に時間を要するため過電圧の振動は長周期となる。このために過電圧の継続時間も長くなり、また、避雷器の放電電荷量もそれにより多くなる可能性が、シミュレーションにより明らかとなった。
- なお、その後の調査の結果、新田端変電所同様に切替セクションが変電設備から遠方に設備されている新与野き電区分所においても、新田端変電所同様に避雷器の多頻度動作が確認されている。
- 新田端変電所の場合、変電所位置から中セクション開放端までの距離は3km18m、同様に新与野き電区分所の場合は2km969mである。一方、上越新幹線新大宮変電所の場合は2km444m離れているが避雷器の多頻度動作は見られていない。避雷器の制限電圧値の微妙な違いにも大きく依存すると思われるが、開放端までの距離が概ね3km程度の場合に、避雷器の多頻度動作がもたらされている。
- 単純な過電圧の往復であれば、新田端変電所の場合では20 μ s後に反射波が到達するが、過電圧がピークを迎えるのは38 μ s後であることが、電圧測定、放電電流測定、サージインピーダンス測定の三方面から確認された。このように、進行波の波頭が変歪することについては、架線構成がメッセンジャーとトロリ線からなる梯子型回路であることに起因することが、シミュレーションにより確認された。

なお、本論文では真空開閉器の無負荷投入過電圧現象に特化して進行波現象をまとめたが、負荷投入時の高周波再発振現象も詳細に考察すると進行波の伝搬がその過電圧要因であることが分かる。今後、より統一的な解釈に向けた検討を進めていく予定である。

謝 辞

本論文でまとめた内容は、JR 東日本の現業機関各所で問題となっている中セクションに関わる軽微な事象についての包括的な検討会（通称「中セクションの安全を考える会」）の活動の一環として行った調査・測定結果の一部をまとめたものである。これらの検討は、JR 東日本管内の各現業機関の全面的な協力の下で実現したものであることを付記する。

また、サージ現象論については、工学院大学の小島宗次教授、元国鉄鉄道技術研究所電力研究室長の新井浩一氏、三菱電機株式会社の斎藤勉氏、株式会社明電舎の松井芳彦氏、東海旅客鉄道株式会社の岡井政彦氏、渡辺宗義氏、西

日本旅客鉄道株式会社の川原敬治氏らから有用な意見を頂戴した。ここに深謝する。

（平成 17 年 5 月 27 日受付，平成 17 年 9 月 20 日再受付）

文 献

- (1) H. Hayashiya, et al.: "Investigation of closing surge in Shinkansen changeover section and proposal of a novel power electronics application to avoid the surge", Proc. of International Power Electronics Conference (IPEC2005), No.45-3, pp.1534-1540 (2005)
- (2) Y. Mochinaga, et al.: "Occurrence and Countermeasures for High frequency reignition oscillation in vacuum switch for Shinkansen changeover section", *T. IEE Japan*, Vol.111-D, No.9, pp.777-784 (1991-9) (in Japanese)
安喰浩司・他：「新幹線切替え用真空開閉器の高周波再発振振動と抑制」, 電学論 D, **111**, 9, pp.777-784 (1991-9)
- (3) K. Ajiki, et al.: "Investigation of Shinkansen static changeover switch capable of suppression of exciting inrush current into transformer on train", *T. IEE Japan*, Vol.121-D, No.3, pp.340-346 (2001-3) (in Japanese)
安喰浩司・他：「車両用変圧器励磁突入電流抑制を可能とした新幹線用静止型切替開閉器の検討」, 電学論 D, **121**, 3, pp.340-346 (2001-3)
- (4) K. Ajiki, et al.: "Analysis of the phenomenon associated with the short circuit of Shinkansen changeover switch and development of new type protective relay", *T. IEE Japan*, Vol.122-B, No.4, pp.498-505 (2002-4) (in Japanese)
安喰浩司・他：「新幹線切替開閉器電極間短絡故障に伴う回路現象解析と故障検出継電器の開発」, 電学論 B, **122**, 4, pp.498-505 (2001-4)
- (5) H. Hayashiya, et al.: "Surge impedance test at Shinkansen power system", Tech. Meeting of IEEE, TER-05-023, pp.53-58 (2005) (in Japanese)
林屋 均・他：「新幹線き電システムにおけるサージインピーダンス測定」, 電気学会交通・電気鉄道研資, TER-05-023, pp.53-58 (2005)
- (6) M. Yoshihara: "Advanced real-time electric network transient analyzer for personal computer", *The Journal of the IEEE*, Vol.122, No.5, pp.298-300 (2002-5) (in Japanese)
吉原政昭：「汎用計算機を用いたリアルタイム瞬時値解析システム」, 電学誌, **122**, 5, pp.298-300 (2002-5)
- (7) I. Hayashi: High voltage and plasma engineering, Maruzen (1996) (in Japanese)
林 泉：高電圧プラズマ工学, 丸善 (1996)
- (8) T. Saito, et al.: "A control method to suppress exciting inrush-current of traction transformers by the static change-over switch for the Sinkansen train", 2002 National convention record, IEEE, No.5-194, pp.265-266 (2002) (in Japanese)
斎藤 勉・他：「新幹線用静止型切替開閉器による車両用主変圧器励磁突入抑制に関する検討と現車試験結果」, 平 14 電気学会全大, No.5-194, pp.265-266 (2002)
- (9) H. Hayashiya: "Simulation of the surge propagation in changeover section", IEEE Industry Appl. Soc. Conference, No.3-83 (2005) (in Japanese)
林屋 均：「切替セクションにおけるサージシミュレーション」, 平 17 電気学会産業応用部門大会, No.3-83 (2005)

林 屋 均（正員）1970 年 6 月 28 日生。1999 年 3 月東京大学大学院博士課程修了，同年 4 月東京大学助手を経て，2002 年 7 月から JR 東日本研究開発センター勤務。これまでに、磁気浮上・リニアモータ、プラズマ磁気閉じ込め配位の相互比較、レーザ干渉計測などの研究に従事。現在、主に電気鉄道分野のサージ現象やアーク現象に関する研究に従事。博士（工学）。日本 AEM 学会会員。

安 喰 浩 司（正員）1956 年 3 月 26 日生。1979 年 3 月東京理科大学応用物理学科卒業後，同年 4 月日本国有鉄道入社。現在，（財）鉄道総合技術研究所電力技術研究部（き電）主任研究員。主に電気鉄道における高電圧・絶縁技術および交流き電回路に関する研究に従事。技術士（電気・電子部門）。