

1508 アクティブ制御パンタグラフのための電力供給装置の開発

正 [機] ○山下 義隆 (鉄道総研) 正 [機] 池田 充 (鉄道総研)
正 [電] 森本 大観 (鉄道総研) 正 [電] 根津 一嘉 (鉄道総研)
正 [電] 大矢 寛 (Myway プラス) 正 [電] 大田原 祐樹 (Myway プラス)

Development of the Power Supply Unit for Actively Controlled Pantographs

Yoshitaka YAMASHITA, Railway Technical Research Institute

Mitsuru IKEDA, Railway Technical Research Institute

Hiroaki MORIMOTO, Railway Technical Research Institute

Kazuyoshi NEZU, Railway Technical Research Institute

Kan OOOYA, Myway Corporation

Yuuki OOTABARA, Myway Corporation

The authors are now developing an actively controlled pantograph in order to reduce the fluctuation of the contact force between the pantograph and catenary. It is necessary for the actively controlled pantograph to equip devices, which need electric power, such as actuators and sensors. It will be the crucial issue how to supply the electric power to the devices under the high-voltage circumstances. In order to overcome this issue, the authors develop a power supply unit that derives the electric power from the current collected by the pantograph using a current transformer. The unit enables all the devices necessary for the actively controlled pantograph to be placed on the pantograph. In this paper, the prototype of the above mentioned power supply unit is presented.

Keywords: pantograph, power supply unit, current collection, current transformer, actively controlled pantograph

1. はじめに

鉄道のさらなる高速化を見据えて、著者らはパンタグラフにアクティブ制御技術を適用し、架線・パンタグラフ間の接触性能向上を図っている¹⁾。アクティブ制御を行うためには、対象物に制御力を与えるアクチュエータ、対象物の状態量を把握するためのセンサ、制御アルゴリズムを実行する CPU/DSP など電力を要する機器が必要であり、これらの機器を加圧部にあるパンタグラフ近傍に配置するためには、何らかの方法で電力供給を行う必要がある。本論文では、アクティブ制御を行う上で必要となるパンタグラフ近傍機器への電力供給方法について検討を行った結果を述べる。また、変流器を用いてパンタグラフの集電電流から電力を取り出す電力供給装置の試作品の概要について紹介する。

2. アクティブ制御のための電力供給装置の必要性

2.1 電力供給が必要な機器

パンタグラフのアクティブ制御には、制御を行うためのアクチュエータやパンタグラフの状態量を把握するためのセンサが必要であるが、これら機器の駆動電力をどのように供給するかが大きな問題となる。以下に電力供給が必要な機器を示す (図 1)。

(1) アクチュエータ

制御力を発生させるアクチュエータが空気圧シリンダの場合には、高い応答性を確保するため、制御用電

磁弁を備えたサーボアンプ付き空気圧シリンダの使用が求められる。したがって、制御用電磁弁の駆動エネルギーを供給するサーボアンプへの電力供給が必要である。また、空気圧シリンダではなく、サーボモータなどを使用する場合にはその駆動用電力が必要である。

(2) センサ

パンタグラフと架線間の接触力を制御する際には、パンタグラフの状態量として舟体加速度や剛性要素のひずみなどをフィードバックする必要がある。これら

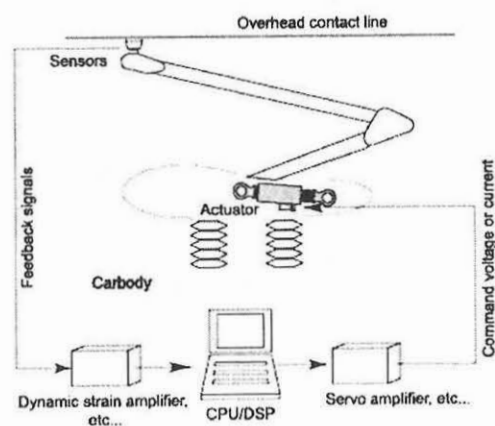


Fig.1 Outline of actively controlled pantograph

を測定するための加速度計やひずみゲージなどを動作させるための電力が必要である(動歪みアンプやチャージアンプなど)。また、接触力ではなく、パンタグラフの変位をフィードバックする場合には、変位計への電力供給が必要である。

(3) CPU/DSP

制御アルゴリズムを実現する制御演算用 CPU/DSP を動作させる電力が必要である(PCなど)。

(4) 情報通信

その他、アクティブ制御の ON/OFF の切り替えや、制御不安定などの異常が生じた場合に運転台等へ通報するための情報通信に要する電力が必要である。

2.2 制御システムの現状

まず、パンタグラフの制御システムについて簡単に説明する。接触力測定用にパンタグラフの舟体部分に取り付けられた加速度計およびひずみゲージからの出力は動歪みアンプを介して PC に取り込まれる。PC では各センサ出力に対して重み付け加算を行うことにより接触力の算出を行っている。また、PC は、算出した接触力と目標とする接触力から PID 制御則に基づいた指令電圧をサーボアンプへと出力する。サーボアンプは、指令電圧に比例した電流をサーボ弁付き空気圧シリンダへと出力する。アクチュエータである空気圧シリンダは入力電流に比例した制御力を発生し、パンタグラフ舟体に作用する接触力を制御する。

現時点では、上述のシステムを用いて原理確認試験を行っている段階であり、このシステムに要する全ての機器をパンタグラフ近傍、つまり実車における屋根上部分(20~25kV 相当箇所)に設置している。ただし、車両屋根上のような加圧状態ではなく、無加圧状態で試験を実施しており、所要の電力も発動発電機や 100V コンセントから供給している。

接触力測定用センサとして絶縁体ケーブルである光ファイバ式の加速度計およびひずみゲージを用いる場合や、画像処理により接触力測定を行う場合には、演算用 CPU をはじめ多くの機器を車内へ搭載することが可能となる。しかし、少なくともサーボ弁付き空気圧シリンダへの電流供給を行うサーボアンプは、加圧部への設置が不可欠であると考えている。したがって、アクティブ制御パンタグラフの実用化には加圧部への電力供給を継続的に実行する技術の開発が必要である。

3. 電力供給方法の検討

パンタグラフに搭載した機器に対する電力供給方法として考えられる方式を以下に列記する。

(1) 絶縁変圧器方式

絶縁耐圧 30kV 以上の変圧器を設置し、車両補助電源をエネルギー源とするものである。既存の新幹線電気・軌道総合試験車や電気検測車でも測定用電源として使われている方法であるが、絶縁変圧器を車内に設置するためには専用特別高圧室が必要となるので旅客営業列車の場合には居住空間が犠牲となる。ドイツ鉄道では、屋根上へ設置可能な絶縁変圧器方式による電力供給装置が開発されている。しかし、製造 1 年後および 3 年毎のメーカー点検が要求されており、営業列車への搭載に必要な耐久性はないことが窺える。この方式は、原理が単純である上、電力伝送が気象状況や集電状況に影響されないという

利点がある。

(2) 変圧器内蔵支持碍子方式(図 2(a))

パンタグラフ支持碍子内部に、絶縁耐圧性能 30kV 以上の変圧器を内蔵し、パンタグラフと車両間の電位差をエネルギー源とするものである。この方式についても原理が単純であり、気象条件に影響されないが、変圧器を内蔵した特殊な碍子が必要であり、寸法および重量が増大することが考えられる。また、架線電圧がある限り電力を得ることが可能であるが、切替セクションなどでの瞬時停電時には電力が得られないため、小容量の電力貯蔵媒体が必要となる。

(3) 変流器方式(図 2(b))

パンタグラフと高圧母線あるいは主変圧器間に変流器を取り付け、二次電流を制御整流するもので、主回路電流がエネルギー源となる。この方式では、車体と非接触での電力確保が可能であり、絶縁の問題を考慮する必要がない。ただし、惰行時など集電電流がほぼ零の場合における電力確保のためにやや大容量の電力貯蔵媒体が必要となるため重量は増大する。また、変流器用電流経路の確保も必要である。

(4) 空気タービン発電機方式(図 2(c))

屋根上(パンタグラフカバー内)に空気タービン発電機を設置し、車両の持つコンプレッサから圧縮空気を供給し発電するものである。この方式では、空気タービンの騒音などを考慮した設計が必要であるが、電力確保が常時可能であり、絶縁の面では空気配管のみを考慮すればよいという利点がある。

(5) マイクロ波・太陽電池方式(図 2(d))

パンタグラフにマイクロ波受信アンテナあるいは太陽電池を設置し、車体からマイクロ波あるいは光を照射して電力を得るものである。原理が単純で、絶縁の問題がないという利点があるが、太陽電池では伝送効率が低く、マイクロ波を使用する場合には法規制があるため注意が必要なほか、気象条件に大きく影響されるという難点がある。

4. 変流器を用いた電源装置

前章で紹介した 5 種類の電力供給方式の中で、実現が比較的容易なものは変流器方式であると考えられる。ここでは、変流器方式を用いた電源装置(以降、変流器式電源装置)の開発に関する検討を行う。

4.1 電気的仕様

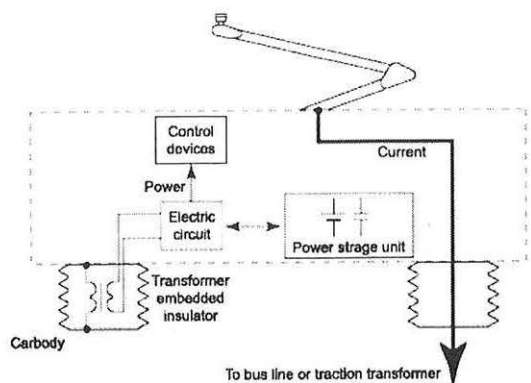
パンタグラフが設置されている屋根上は、風、雨、雪などに曝されるほか、振動下、高電圧下、アークの発生など非常に厳しい環境である。このような条件を考慮にいたった環境仕様も非常に重要であるが、ここでは、電気的仕様に関してのみ検討するものとする。

(1) 電源装置の出力容量

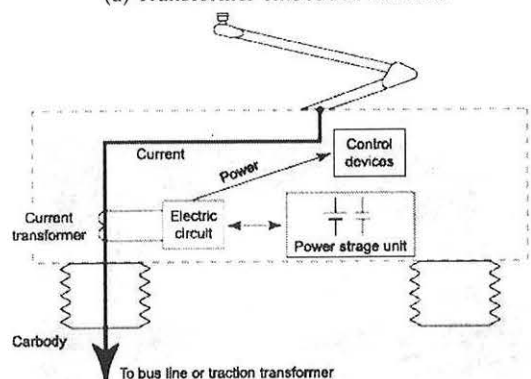
制御に要する全ての機器の定格消費電力に応じて決定するものであり、制御用コンピュータの他に、50~100W 程度の消費電力が必要となると考えている。

(2) 電力貯蔵媒体の種類

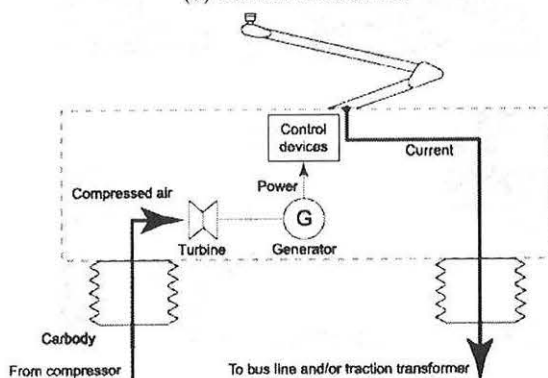
変流器式の電力供給方式では、原理的にパンタグラフの集電電流がほぼ零のときは出力を電力貯蔵媒体に頼る必要がある。本論文では、電力貯蔵媒体として電気二重層キャパシタ(以降、EDLC)を採用することとする。電気二重層キャパシタは、(a)サイクル寿命、(b)使用温度範囲、(c)環境負荷などの点で二次電池と比べて有利である²⁾。



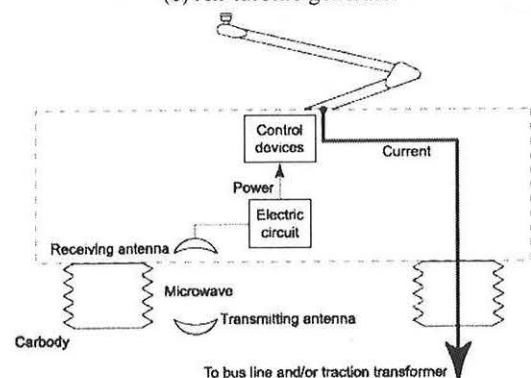
(a) Transformer embedded insulator



(b) Current transformer



(c) Air turbine generator



(d) Microwave

Fig.2 Conceivable power supply alternatives

(3) 電力貯蔵媒体によるバックアップ時間

EDLC が満充電状態で、電源装置による充電のない状態で電力を出力し続けた場合、キャパシタ電圧は時間とともに低下する。実用的には、キャパシタ

への充電電力がある閾値を下回ると電源装置の出力を停止する方法とする。電源装置の最大出力電圧(満充電時)を $V_{\max}$ 、出力を停止する閾値となる電圧を $V_{\min}$ とする。満充電時の EDLC には、

$$E = \frac{1}{2} C (V_{\max}^2 - V_{\min}^2) \quad (1)$$

なるエネルギー E [J] が利用可能である。ただし、 C [F] は EDLC の静電容量である。また、実際には EDLC や変換器に損失があるが、ここでは理想的な条件として損失なしと考えた場合のエネルギー量を示している。これを電源装置の出力 P [W] で除すことによってバックアップ時間 T_b [s] を求めることができる。

$$T_b = \frac{E}{P} \quad (2)$$

ただし、電源装置の出力は一定としている。このようにして必要なバックアップ時間を決定し、EDLC の静電容量を算出すればよい。パンタグラフのアクティブ制御を必要とする高速車両では走行抵抗の多くを空気抵抗が占めるためノッチオフ時間があり多くないことを考慮し、今回は3分間程度のバックアップ時間を確保することを目標とした。

(4) 瞬時停電や励磁突入電流などへの耐性

新幹線には異電源区間を区分するための切換セクションが設けられており、ここを通過する際には瞬時停電が発生する。セクションの切換え遮断器が動作して無加圧から加圧される際に、主変圧器には励磁突入電流という定格の数十倍程度の大電流が流れる。このような電流急変に耐える機能を有する必要がある。

4.2 試作機

定置試験用として試作した変流器式電源装置の概要を図3、写真を図4に示す。本試作機は、機能確認を目的として製作したため、環境仕様に関しては厳しい基準を設けていない。以下に電源装置の主な構成要素の役割を記す。

(1) 変流器を接続する入力端子

本装置には変流器は含まれない。別途用意した変流器からの電流入力を受ける端子である。

(2) 整流回路

交流の入力電流を全波整流し、直流へと変換する回路である。

(3) EDLC への充電制御回路

EDLC の充電量が定格容量を超えないように制御するための回路である。EDLC 電圧をモニタして制御基板にフィードバックし、充電量が定格容量を超えた場合は、制御基板からの制御信号を受けて EDLC に電流を流さない電流経路を構成し(入力短絡)、EDLC を保護する。

(4) EDLC

使用した EDLC は1個あたりの静電容量 233F、内部抵抗 17mΩ の市販品であり、2個直列接続したものを2組並列で使用する。その内1組は、EDLC の容量を変更した場合の特性を評価できるようにコネクタによって切り離すことができるようにしている。

(5) 昇圧チョッパ回路

EDLC の電圧が変化しても出力の電圧を一定に保つための回路である。出力電圧を常にモニタして制

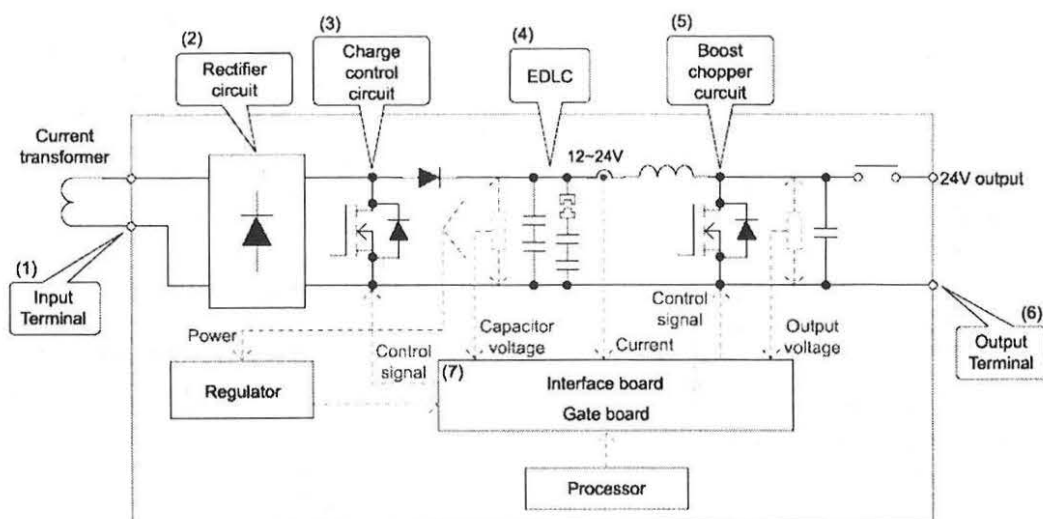


Fig.3 Outline of the current transformer type power supply unit (prototype)

御基板にフィードバックし、これに応じた制御信号を受けてスイッチング素子（MOSFET）の ON/OFF を制御し、出力電圧を DC24V に保つ。

(6) 出力端子

容量 DC200W, 電圧 DC24V, 最大電流 DC8.5A なる電力を出力する端子であり、制御などに必要な機器に電力を供給する。

(7) 制御基板

上述 EDLC への充電制御回路および昇圧チョッパ回路への信号を与えるための制御を行う基板である。基板に必要な電力は EDLC から賄われる。電圧および電流をモニタし、過電圧および過電流から電源装置内の機器および電源供給先の機器を保護するように入力短絡や出力開放を行う。また、外部からのマニュアルスイッチ入力（出力開始/停止や非常停止など）を内部回路へ伝え、外部へ装置内の状態（充電残量やエラーなど）を表示する。

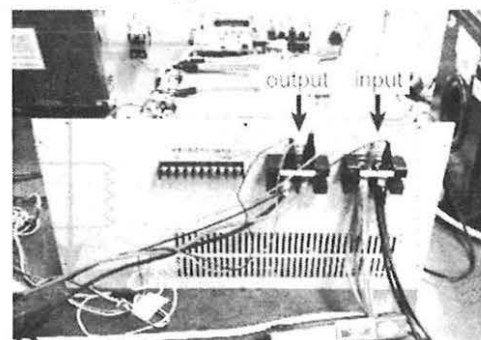
本試作機では、EDLC を 2 組とも使用してから変流器の一次電流の供給を断ち、充電を伴わない状態で充電残量が満充電時の 60% となった時点で出力を停止するという条件の下では、最大出力（DC200W）を約 3 分間維持することができる。出力停止を決定する充電残量の閾値は外部のトリマで任意に設定することができる。本試作機は、実車への搭載を前提としていないが、出力電力およびバックアップ時間については十分実用に耐え得る仕様となっている。

5. まとめ

パンタグラフのアクティブ制御に必要な制御用機器への電力供給を行うための電源装置について検討した。本論文では、数種類の電力供給方式を考案し、比較・検討した結果、最も実用性が高いと考えられる変流器式電源装置の開発を行うこととした。変流器式電源装置の電力源はパンタグラフの集電電流であり、その原理は、変流器によって主回路への電力の一部を制御用電力として取得するというものである。集電電流が零になるノッチオフ時などにおいても電力供給を行う必要があるため、電力貯蔵媒体として電気二重層キャパシタ（EDLC）を用いることとした。試作した変流器式電源装置の EDLC は、充電なしの条件でも満充電の状態から DC200W の電力



(a) Overall view



(b) Back shot

Fig.4 Pictures of the current transformer type power supply unit

を約 3 分間出力し続けることが可能である。

今後は、紹介した試作機を用いて通電状態のパンタグラフから電力を取得し、EDLC への充電速度や間欠的な集電状態における出力安定性などを調査する予定である。また、風雨、振動、高電圧、アークといった厳しい環境に晒される車両屋根上への設置を前提とした環境仕様についても考慮した開発を目指す予定である。

参考文献

- 1) 山下義隆, 池田充ら : 日本機械学会年次大会講演論文集, 5 号, pp123-124, 2008
- 2) 岡村勉夫: 電気二重層キャパシタと蓄電システム, 日刊工業新聞社, pp.17-23, 2001.