

# 車両用同期並列運転方式S I Vシステム

## Autonomous Synchronizing Parallel drive Redundant SIV system

Conventional auxiliary power supply for EMUs (SIV) have provided individual electric classification. In fact, supply system on a train consists of two or more power source equipments.

But a case of a unit failure, those redundancy constitution could not prevent short time power down or choking off air conditioner to half power operation.

This paper describes details of the solution such as full time parallel drive, autonomous synchronizing control without phase referring line, simultaneous start up of all units. And this new redundancy power supply system will provide quality of comfort for passengers and provide a redundancy system for EMUs which is consisted by the minimum configuration.

大塚 貴敏

Takatoshi Ohtsuka

### 1. まえがき

車両用補助電源装置 (SIV) は、蛍光灯、空調装置、電動空気圧縮機、その他、各種の制御装置へ電力を供給するものである。

一般的な在来線では、DC1500V を三相 AC440V または200V 60Hz に変換し、負荷側へ定電圧の電力を供給する。

従来の単機型 SIV では、編成内に複数の SIV を搭載し、SIV 単位で給電区分が区切られており、各々の SIV は独立で電力供給を行っている。また、短編成の場合は SIV が一台しか搭載されていない場合もある。

一台の SIV が故障した場合、編成内に SIV が複数台搭載されている場合には、接触器により給電区分の三相幹線を短絡し、正常に動作している SIV から電力供給を受けるが、その間に、故障している SIV 側の給電区分は一旦停電すると共に、給電時には負荷量の関係により、空調を半減する必要がある。短編成の場合は SIV が故障すると、前途運用不能になってしまう。

また、編成内のパンタグラフが引き通しになっていないシステムでは、パンタグラフの瞬時離線により入力が遮断、SIV が停止する場合がある。

昨今では、乗客から客室環境の向上が求められ、客室灯の停電、満員乗車時における空調半減はクレームに直結するため、停電を極力回避する冗長系システムの開発が求められている。

そこで、当社では産業用完全分離方式並列CVCF<sup>(1)</sup>の技術を応用し、車両用同期並列運転方式SIVシステムを完成させた。

### 2. 特徴

当社が開発した車両用同期並列運転方式SIVシステムは以下の特徴を有している。

- ①SIVの並列運転が可能なることから、三相幹線が引き通しで構成でき、SIV故障、瞬時離線に対して三相幹線が停電することが少なくできる。
- ②一台のSIVは2群のインバータで構成されている。各々のインバータは装置内で並列運転しており、短編成でSIVが一台しか搭載されていない場合においても停電がおこりにくいシステムとしている。
- ③重要部品である制御ユニット、三相インバータ部は2群構成とし、冗長性を更に高めている。
- ④一斉起動指令線(1本)、横流検出線(4本)を車両に引き通すだけで、複数のSIVが何台でも同期並列運転ができる。
- ⑤並列運転時における各SIVの出力容量はほぼ同一であり、機器の稼働率は同一である。このことから、部品の劣化進捗が編成内で均一となり、定期交換部品の同時期交換が可能となる。
- ⑥一斉起動指令線一本にて、全てのSIVの一斉起動が可能である。従来の単機型SIVと同等の起動性を有しており、起動時の負荷制御が不要である。

### 3. 主回路構成

主回路構成を図1に示す。

主回路は直接制御の2レベルインバータで構成される。

一台のSIVは二台のインバータを搭載し、三相変圧器の二次側で各々のインバータ出力を並列接続することで、冗長系を図ると共に、並列運転することで1群故障時にも三相幹線が停電しないようにしている。

なお、高速度遮断器、直流フィルタリアクトル等の入力部および放電回路はシステムの小型化を図るため一重系で構成している。

各インバータは個別の制御アンプで制御することで、完全分離制御方式の並列システムを構成している。また、SIVの制御にはRISCチップコントローラを採用し、瞬時値制御を行うことで、並列運転時および入力電圧変動、負荷変動等の過渡変動時においても、常に安定した三相電圧を出力することを可能とした。

並列制御のための横流検出回路はU相、W相の二相に設けており、図1はSIV一台分の回路であるが、横流検出部を並列接続することで、複数のSIVの並列運転が可能である。

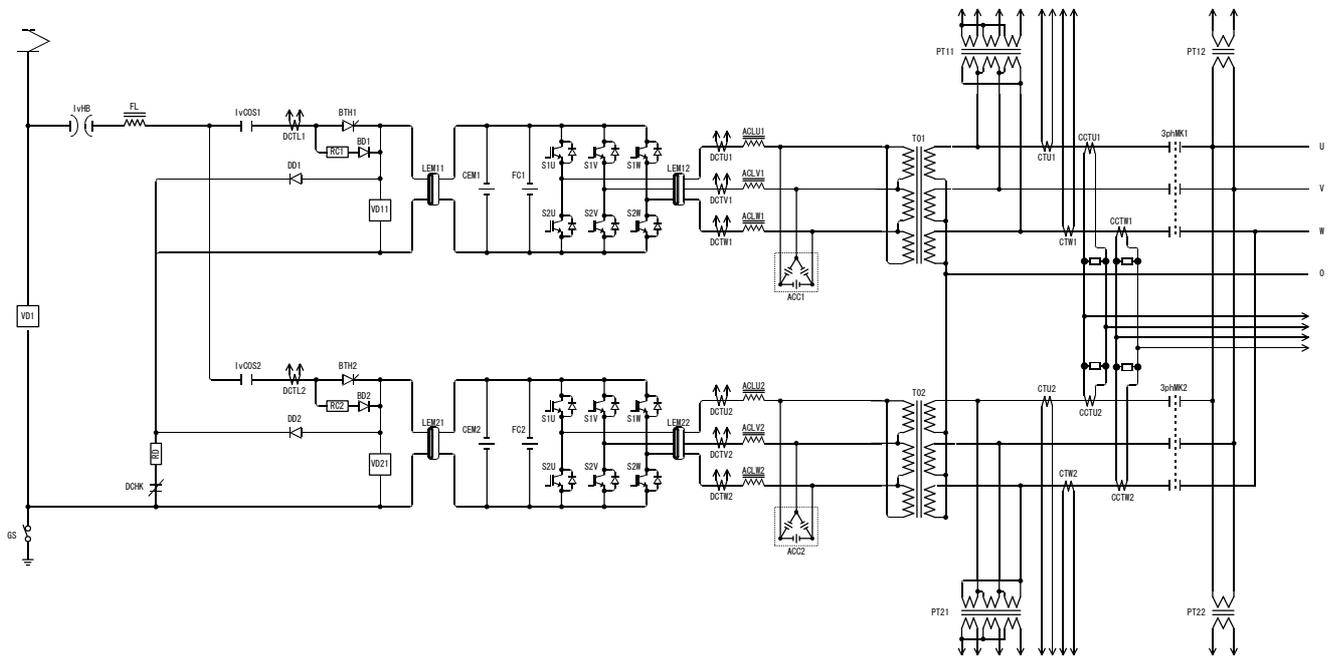


図1 主回路構成

Fig.1 Schematic Diagram

## 4. 並列制御

### 4.1 並列運転時の横流

複数のインバータを並列に接続して運転した場合、各インバータの出力電圧の大きさと位相が同じ状態でないと、電力は負荷には供給されずインバータ間のみを流れる「横流」が流れる。図2はインバータを二台並列に接続した概念図である。

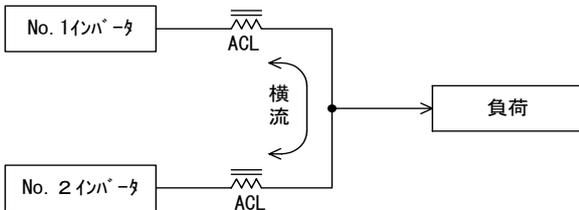


図2 横流概念図

Fig.2 Definition of Cross Current

この「横流」を“0”に制御することにより、各インバータの出力電圧がバランスした状態となり安定した並列運転が可能となる。

SIVは出力回路にACフィルタ回路を有しており、このACフィルタ回路には交流フィルタリアクトル(ACL)がある。各インバータの出力を並列に接続した場合、このACLを介した並列接続となる。

横流はこのACLを介して流れるため、各インバータの出力電圧の大きさが異なる場合と、位相が異なる場合で出力電圧と横流の関係が異なる。

#### ①電圧の大きさが異なる場合

各インバータの出力電圧の大きさが異なる場合、ACLに印加される電圧(インバータ間の差電圧)はインバータの出力電圧と同相となる。(但し、インバータ間の出力電圧の位相は一致しているものとする)

ACLすなわちインダクタンスに印加された電圧とその結果流れる電流は $90^\circ$ 位相が異なる関係となる。そのためインバータ出力電圧に対して横流は $90^\circ$ 位相が異なって流れる。すなわち出力電圧に対して大きさが異なる場合の横流は無効電流となる。

この状態を表した図を図3に示す。

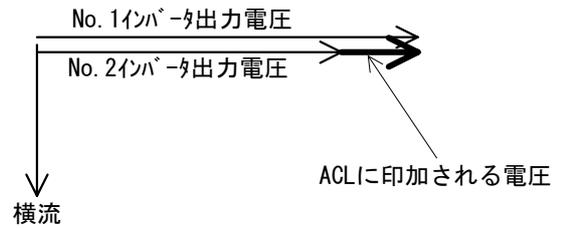


図3 電圧の大きさが異なる場合の横流(ベクトル図) 図

Fig.3 Vector Diagram of Cross Current at Voltage error

#### ②電圧の位相が異なる場合

各インバータの出力電圧の位相が異なる場合、ACLに印加される電圧(インバータ間の差電圧)はインバータの出力電圧と概ね $90^\circ$ 位相が異なる関係となる。(但し、インバータ間の出力電圧の大きさは一致しているものとする)

ACLに印加される電圧はインバータ出力電圧と約 $90^\circ$ 位相が異なるため、ACLに流れる電流はインバータ出力電圧とほぼ同相となる。すなわち出力電圧に対し位相が異なる場合の横流は有効電流となる。

この状態を表した図を図4に示す。



図4 位相が異なる場合の横流(ベクトル図) 図

Fig.4 Vector Diagram of Cross Current at Phase error

### 4.2 横流検出回路

各インバータの制御を完全分離制御方式とするため、横流の検出回路はCT並列接続方式を採用している。各インバータの出力側に変流器(CT)を入れ三相分の出力電流を検出し、このCTを並列接続し横流を検出している。図5に概略図を示す。

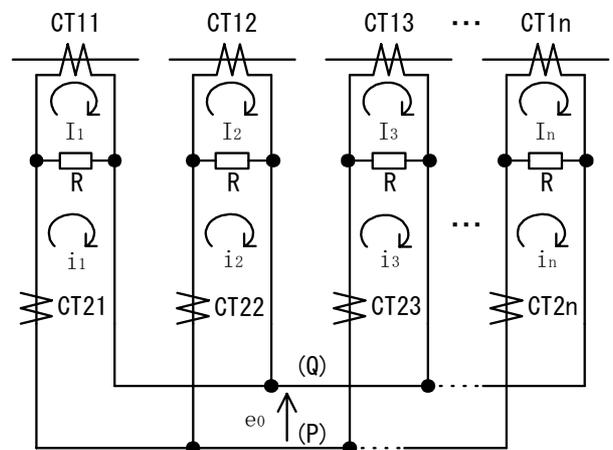


図5 CT並列接続方式による横流検出回路

Fig.5 Detecting Circuit of Cross Current

$$\left. \begin{aligned} R(I_1 - i_1) - ri_1 &= e_0 \\ R(I_2 - i_2) - ri_2 &= e_0 \\ \dots \dots \dots \\ R(I_n - i_n) - ri_n &= e_0 \end{aligned} \right\} \dots \quad (1)$$

$$R \sum_{k=1}^n i_k = 0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

従って、(1)、(2)式より

$$R \sum_{k=1}^n i_k - (R+r) \sum_{k=1}^n i_k = ne_0$$

$$\frac{e_0}{R} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n i_k = I \quad (I \text{は} I_1 \sim I_n \text{の平均値})$$

ただし、r は並列接続回路の接続線の抵抗及び横流検出回路の抵抗の総和である。

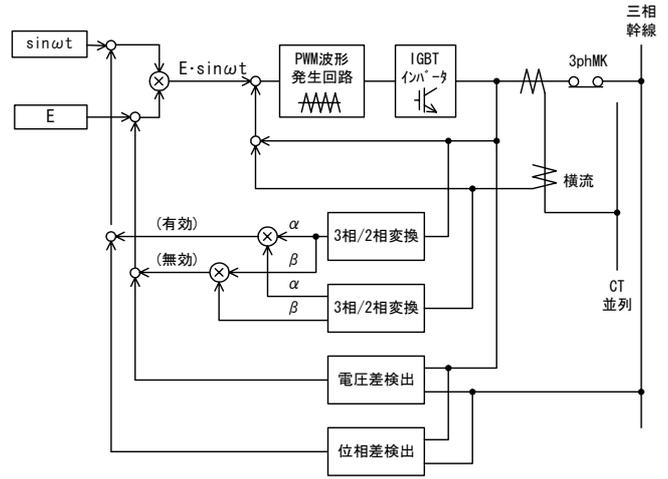
No.kのインバータのCT2次並列接続回路に流れる電流  $i_k$  は次のようになる。

$$i_k = \frac{R}{R+r} (I_k - I)$$

すなわち、 $i_k$  はNo.k インバータの出力電流と並列運転されている全インバータの出力電流の平均値との差、つまり横流を検出することになる。

CT 並列接続方式で取り出した横流と出力電圧を各々三相/二相変換し、 $\alpha$  軸と  $\beta$  軸の直交する2軸に座標変換し、出力電圧の  $\alpha$  軸成分に横流の  $\alpha$  軸成分(出力電圧と同相の成分)を乗ずることにより横流の有効電力が求められる。同様に出力電圧の  $\alpha$  軸成分に横流の  $\beta$  軸成分(出力電圧と90° 位相の異なる成分)を乗ずることにより横流の無効電力が求められ、横流に含まれる有効電流と無効電流の分離が可能となる。

並列制御の概念図を **図6** に示す。



**図6 並列制御概念図**

**Fig.6 Block Diagram of Error Suppression Control**

### 4.3 横流による並列制御

複数のインバータを並列運転する場合、前項までに説明した横流を0に制御することで並列運転が可能となる。

出力電圧に対して無効分の横流が検出された場合、その横流が0になるように出力電圧を制御する。また出力電圧に対して有効分の横流が検出された場合、その横流が“0”となるように位相を制御する。

**図7** に並列制御系のブロック図を示す。各インバータの制御アンプは440V 成分の重みを持つ  $E(\sqrt{2} \times 440[V])$  と、60Hz 成分の重みを持つ  $\sin \omega t (2 \times \pi \times 60[\text{rad/sec}])$  という基準を有している。このEと  $\sin \omega t$  を掛け算することで440V、60Hz の正弦波を得ることができる。インバータ単体で制御する場合はこの基準信号にしたがった電圧を出力する。

#### ①大きさが異なる場合

インバータ間の出力電圧の大きさが異なっている場合、横流は出力電圧に対して無効分として流れる。制御アンプは横流の無効分を検出し、横流の極性に従いEの値を補正する制御を行う。ここで  $G_v$  は電圧の大きさを補正するための制御ゲインである。

#### ②位相が異なる場合

インバータ間の出力電圧の位相が異なっている場合、横流は出力電圧に対して有効分として流れる。制御アンプは横流の有効分を検出し、横流の極性に従い  $\omega t$  の t 値を補正する制御を行う。ここで  $G_{ph}$  は位相を補正するための制御ゲインである。

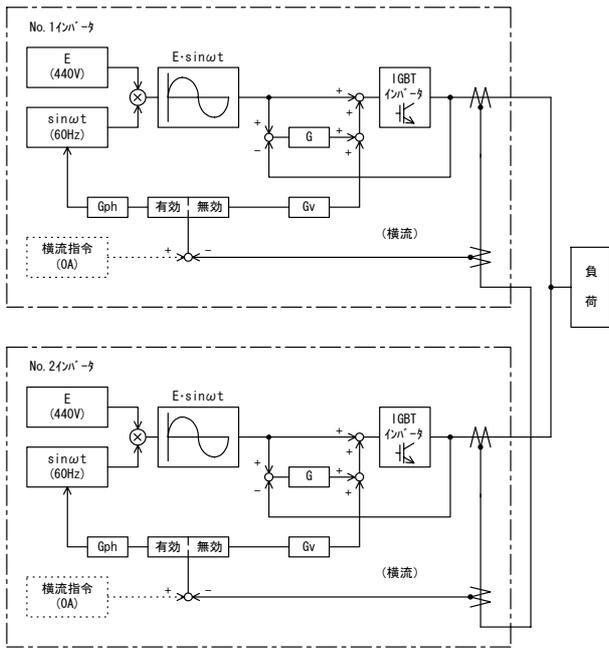


図7 二台のインバータによる並列制御ブロック  
Fig.7 Block Diagram of Parallelized Control  
by two Inverter Units

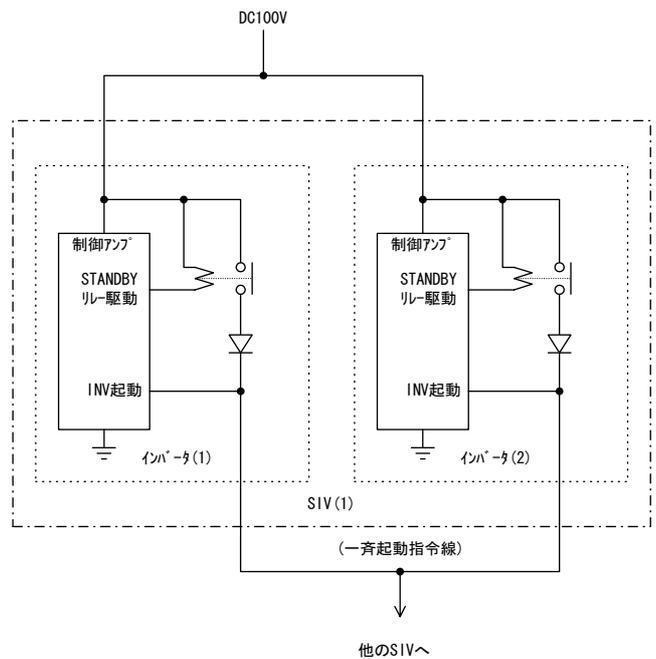


図8 一斉起動指令線接続図  
Fig.8 Schematic Diagram of Simultaneous Start Up  
Command line

## 5. 一斉起動と再投入

### 5.1 一斉並列起動方式の採用

三相幹線に並列に接続されたSIVを順次起動させると、所定の容量のSIVが起動するまで、負荷投入を制限する必要がある。

負荷投入を制限する方法としては、列車情報装置により制限する方法があるが、SIVは車両の中でも一番最初に立ち上がる機器であり、列車情報装置からの指令によりSIVを起動したのでは、従来形SIVより起動が遅くなる。

また、列車情報装置のない車両では、負荷制限のための装線が増える。

その問題を解決するために、本システムでは、一斉並列起動方式を採用している。

### 5.2 一斉起動制御

インバータの一斉起動を可能とするための指令線接続を図8に示す。

各インバータは、起動条件が成立し、三相幹線電圧がないことを条件にSTANDBYリレーをオンし、一斉起動指令線が加圧される。各インバータは初期動作を行い、インバータ動作のための準備が整うとSTANDBYリレーをオフする。

インバータ動作のための準備が整ったインバータから順にSTANDBYリレーをオフしてゆき、最後のインバータの準備が整うと、一斉起動指令線が無加圧となり、各インバータはその変化を捉え、一斉にゲートをスタートする。

各インバータは横流で電圧位相を制御しながらソフトスタートで電圧を立ち上げる。

### 5.2 並列解体と再投入

インバータに保護動作があった場合は、該当インバータは瞬時ゲートオフ、入力接触器および出力接触器を開放し、異常群を切り離す。

保護動作がリセットされた場合は、三相幹線電圧と同期をとりながら再度起動し、定格電圧にて同期がとれた時点で出力接触器を投入して、並列再投入する。

## 6. 現車試験

本論文で報告したSIVを、編成に二台を搭載した現車での試験結果を以下に示す。なお、インバータの並列台数は4台である。

### 6.1 主要諸元

表1 主要諸元

Table 1 Feature

項目	仕様
編成	Mc1-T1-T2-T2-T2-T1-M1-Mc2 *SIVはT1車に搭載
主回路方式	直接変換2レベルインバータ (2バンク、並列運転方式)
電気方式	DC1500V 架空電車線方式
負容量	150kVA (SIV一台あたり)
並列台数	4インバータ (SIV二台)
負容量	150kVA (SIV一台あたり)
出力種別	三相交流4線式

### 6.2 現車試験結果

図9にSIV起動特性を示す。

データは編成中の一台のSIVのものであるが、一斉にゲートオンし、横流で制御しながら出力電圧が立ち上がる様子がわかる。全SIVが立ち上がるまでの起動時間は、従来の単機型SIVと同等である。

図10は、空調を順次起動させたときのデータである。空調投入による負荷変動に対しても出力電圧は安定している。

図11は、電動空気圧縮機を起動させたときのデータである。電動空気圧縮機のような突入電流の大きい負荷に対しても出力電圧は安定している。

図12は、空調をオフさせたときのデータである。空調は一斉にオフしているが、このような比較的大きな負荷を切っても出力電圧は安定している。

図13は、4群のうち1群を強制開放したときのデータである。1群を開放してから負荷半減に至るまで、残り三台のインバータで全負荷供給を継続し、負荷半減が完了した時点で2群は出力を絞っている。

その後、1群リセットにより、1群が動作を開始し、三相幹線電圧と同期がとれた時点で並列再投入し、4台並列が完了している。

群ダウンは、正常な群にとっては大きな負荷変動と同等の事象であるが、そのような変動に対しても出力電圧は安定している。

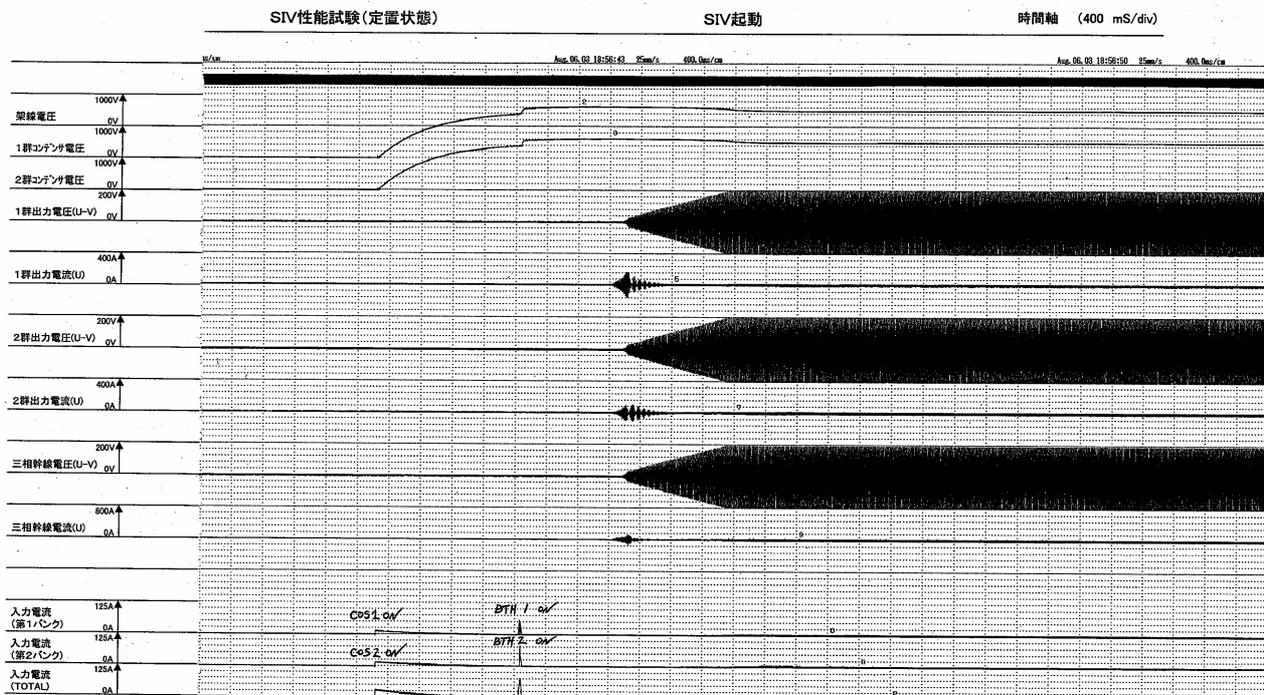


図9 SIV 起動特性 (現車試験データ)

Fig.9 Start Up Characteristics by two Inverter Units (field data)

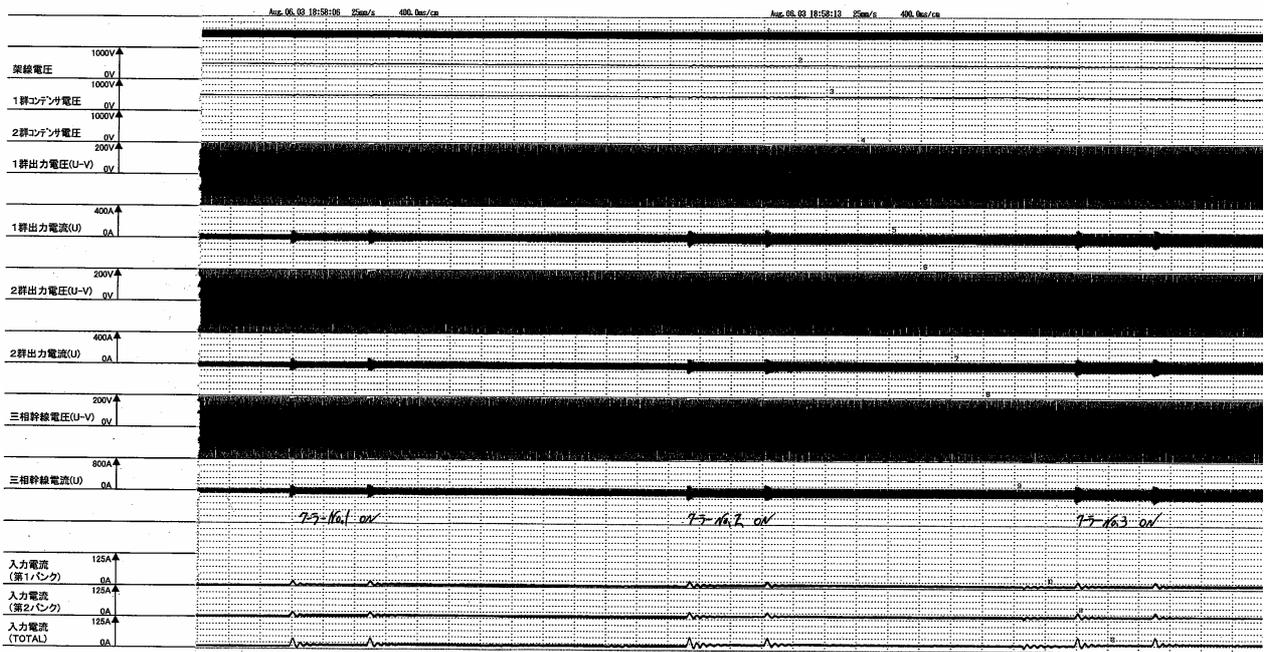


図 1 0 空調起動特性 (現車試験データ)

Fig.10 Characteristics of Air Conditioner Starting (field data)

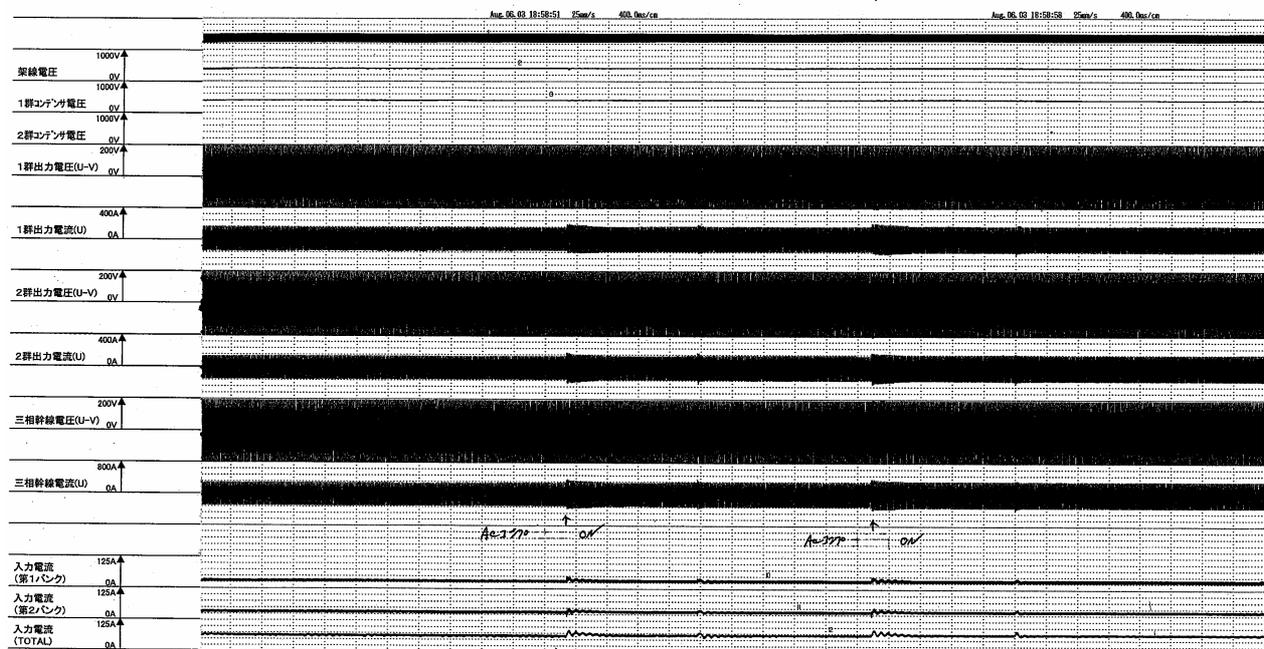


図 1 1 電動空気圧縮機起動特性 (現車試験データ)

Fig.11 Characteristics of Compressor Starting (field data)

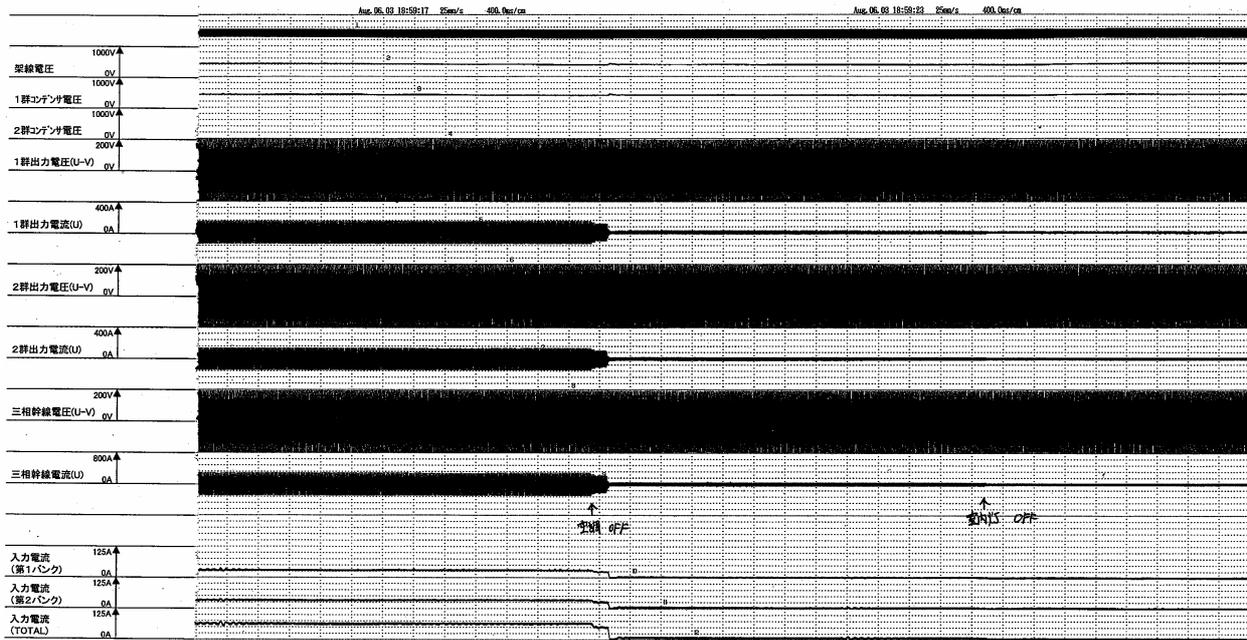


図 1 2 空調停止特性 (現車試験データ)

Fig.12 Characteristics of Air Conditioner Stopping (field data)

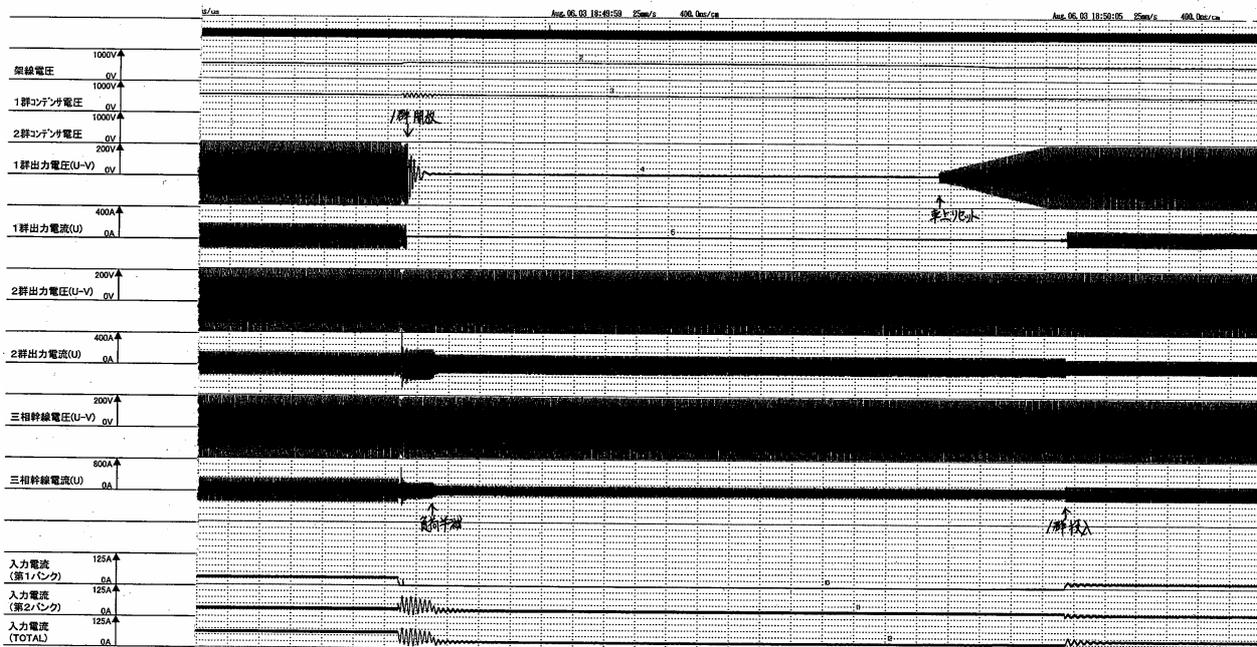


図 1 3 並列解体再投入 (現車試験データ)

Fig.13 Characteristics of Stop and Restart for one of a pair Units

## 7. むすび

車両のサービス機器が増え、従来にも増して車両用補助電源装置の重要度が増している。

三相幹線電圧の停電は、夜間およびトンネル内での蛍光灯消灯、空調の停止となり、乗客からのクレームへと直結する。

この問題を解決すべく、並列運転方式の車両用補助電源装置を開発した。

この装置の特徴は、インバータ間を流れる横流を直接検出し、瞬時値制御を行うことで過渡変動に対しても安定した出力を供給できること、および伝送を介さないため、伝送ダウン時にも安定して動作できることである。

また、インバータを並列接続できることで、適切な出力容量設定により、1インバータ停止時においても全負荷供給が可能となり、また従来の単機型 SIV に対して編成での総出力容量が下げられるというメリットがある。

本制御を用いた補助電源装置は、インバータ2並列のシステムが東日本旅客鉄道株式会社殿 E993系で、インバータ4並列のシステムが阪急電鉄株式会社殿9300系で採用され現在、問題なく稼動している。

---

## 参考文献

---

- (1) 飯田：「完全分離方式並列 CVCF」東洋電機技報33号，1978年，pp. 45-53

---

## 執筆者略歴



### 大塚 貴敏

1990年入社。相模製作所交通工場設計部にて車両用補助電源装置の設計業務に従事。現在交通設計グループにて補助電源装置設計に従事。