UDC 621.335:621.314.63.07

車両における応用

Application to Electric Rolling Stock

宮上行生*
Yukio Miyakami

I. まえがき

わが国における交流電化は日本国有鉄道による昭和30年の仙山線の運転開始以来着実に進展を続けているが，大容量，高耐圧の半導体整流素子，特にシリコン整流素子の開発，進歩により高信頼度，高性能の交流または交直流電気車が実用化され，これが交流電化の進展に対し一層拍車をかけたことは事実である．このシリコン整流素子についても開発当初のろう付接続スタッド形構造に対し，電気車両特有の極端な間欠負荷に対する接合部の熱応力を考慮して皿ばねなどによる圧接形構造の実用化さらには，油などの液体または気体による両面冷却を考慮した平形構造の実用化とその進歩は著しく，素子単体の高耐圧，大容量化と相まって装置の大容量化，小形軽量化を可能としている．サイリスタについては上述したシリコン整流素子の利点，さらにその高速スイッチとしての利点から車両における多くの応用分野が予測され，そのうちの一部はすでに日本国有鉄道などにおいて数多く実用化されている．すなわち高耐圧，大容量のサイリスタ素子の実用化によりたとえば従来の交流車両におけるタップ切換器とシリコン整流素子の組合わせにより行なっていた駆動電動機の電圧制御系を，サイリスタの位相制御に置き換えることが可能となり，電気車の制御性能上無段階連続制御が行なわれることから乗心地，粘着性能の向上が可能となり機構上保守点検のひん度の多かった主回路開閉器が無接点化され，保守点検の費用が著しく軽減するなど数多くの利点が生れている．さらにはサイリスタの高耐圧，大容量化に伴ない，直流電気車においてもサイリスタチョッパなどによりサイリスタ交流車両と同様に無段階連続制御および無接点化が可能となるため実用化への試みがなされている．今後の電気車へのサイリスタ応用の分野における方向としてはサイリスタ素子の高耐圧，大容量化，さらには高速化など素子自身の開発に伴ない駆動電動機の無整流子化，新冷却方式の採用による機器の小形軽量化などが問題となろう。

II. 車両用大容量半導体素子

車両の駆動電動機を負荷とする半導体素子には，電鉄負荷特有の極端な間欠負荷に対し長期間安定に動作する必要があるほか，車両に搭載されることから装置の小形軽量化が必要となり，装置に使用される素子は高耐圧，大容量化が不可欠の要因となる．当社においては早くから高耐圧，大容量の半導体素子の開発を行ない，今日みるごとき大容量の電力用半導体素子の系列量産化に成功した．すなわち素子が大容量になると，通常中小容量で一般に採用されている接合部と外部との接続部のろう付部分が一つの弱点となり，特に電鉄負荷のごとき激しい間欠負荷に対しては熱によるくり返し応力によって素子を破壊にいたらしめるという本質的な欠点が存在する．当社の半導体大容量素子は接触部のろう付の代りに皿ばねによる圧接構造を採用することにより[1]，この問題を根本的に解決することができた．この画期的な構造はその後各分野における長期の良好な使用実績からもその正当性が裏付けられている．一方単位素子がさらに大容量化すると接合部に発生する熱損失を通常の構造のねじ込み式冷却体に放出する方法では冷却容量が不足となり，熱的に限界を生じるがこの問題に対して当社は上述したように，圧接形の原理を応用して素子を平形構造としアノード，カソードの両面冷却を可能として大容量化に対処している[2]．日本国有鉄道においては早くから半導体素子の車両への適性に着目され，さらに量産車両における部品の統一の意味から車両用の大容量半導体素子について規格化が行なわれた．第1表に当社標準系列の大容量素子のうち日本国有鉄道の規格に適合する素子を選び，その主なる特性を紹介する。

第1表　日本国有鉄道標準素子と当社素子との対応表
Table 1. Fuji silicon diode and thyristor elements corresponding to J.N.R standard

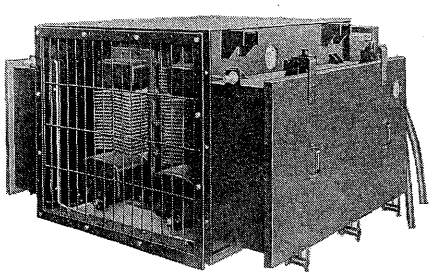
日本国鉄形式	SI300	CSI250	CSI400	CSI 400X	SI800
当社形式	SIN01	GTN01	KGP 03-25	KGP 21-13	KSP 03-25
主な特性	1,200V 280A	1,200V 250A	2,500V 400A	1,300V 400A	2,500V 800A
備考	スタッド形ダイオード	スタッド形サイリスタ	平形サイリスタ	平形サイリスタ（高速形）	平形ダイオード

III. 車両用大容量半導体素子の冷却方式

周知のごとく電力用半導体の冷却方式には多くの方式

* 電鉄・技術部

が考えられるが，今日車両用においても多くの場合は風冷式構造をとっている．これは主として従来の半導体素子が風冷を前提とした構造に設計されていたためであるが，最近のように単位素子が大容量化されると通常の風冷で冷却を考えると冷却装置も大形化し，これは車両用としての小形軽量化の命題に反することになる．さらには風冷式の場合，冷却風を外部より採り入れる必要があること，充電部分を冷却風にさらす必要があることなどからふんい気の影響を受けやすく，雪，湿気，ごみなどによる絶縁物の絶縁劣化の防止に多大の注意を払う必要があった．これらの問題に対し当社においては **II.** に述べたように半導体素子自身を平形とし，この平形素子の両面を冷却体にはさみ込んで圧接することにより，素子—冷却体間の熱抵抗を大幅に低減させ，さらにこの素子—冷却体にて構成したスタックを油中に浸せきして密封化することにより，充電部分と外気としゃへいするなど，従来の車両用整流装置に対し画期的な構造をもつ装置を開発完了した．この方式によれば充電部分はすべて油中にあるため絶縁距離も短かくてすみ，全体として同一容量の風冷方式に比較して著しく小形化されるほか，絶縁劣化のおそれもなく，保守不要の構造となっている．第1図に本方式による装置の外形を示す．なおこの装置は日本国有鉄道にて好調裏に長期試運転中である。



第1図　車両用油浸整流装置

Fig. 1. Oil cooled silicon rectifier set for electric car

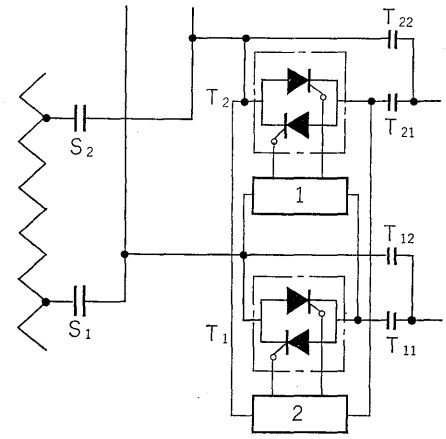
IV. 交流電気車へのサイリスタの応用

交流電気車へのサイリスタ素子の応用例としては大別して次のように分類できる。

1. サイリスタをスイッチ素子として使用する場合

1) 無電弧タップ切換方式[3]

従来交流電気車の駆動用電動機の電圧調整方法としては変圧器の巻線タップを切換えて行なっているが，負荷電流の開閉には通常気中しゃ断器が使用されていた．車両においてはこの切換回数が極端に多いためこのしゃ断器には相当の保守を要するのが実状である．数年前より電力用サイリスタ素子の進歩によりこの気中しゃ断器をサイリスタに置き換えて完全な無電弧切換とすることが可能となり現在ヨーロッパにおいては数百台におよぶ量



第2図　無電弧タップ切換回路

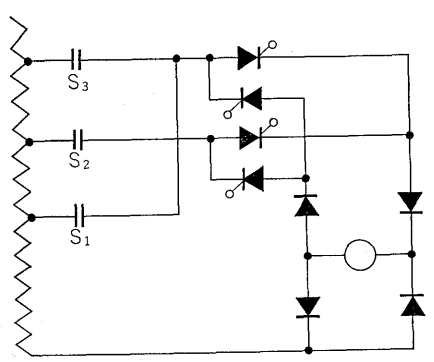
Fig. 2. Arcless tap changing circuit

産形交流機関車においてこの方式が標準として採用されている．以下にこの方式の動作原理の概略を説明する．第2図において T_1，T_2 はおのおのサイリスタ素子を逆並列に組合わせたサイリスタスイッチ要素であり，ゲート制御装置1，2はおのおののサイリスタのゲートへ制御信号を与えるための装置であり，S_1，S_2…… はセレクタスイッチで変圧器のタップ巻線を選択するものである．今 S_1—T_1 により通電している状態から1段上のタップ S_2 へ切換える場合は，サイリスタスイッチ T_2 のゲートは無信号の状態で S_2 を閉となし，サイリスタスクイッチ T_1 のゲート信号を中断すると，遅くとも半サイル後に S_1-T_1 を流れていた電流は中断される．この後直ちにサイリスタスイッチ T_2 のゲートに信号を与えれば主電動機回路はほとんど時間遅れなしに S_2 のタップ電圧に切換えられるこの後 S_1 を開いて完全に回路の切換えを終了する。

2) 位相制御付無電弧タップ切換方式

動作原理は第3図に示すごとく大略上記 1) と同じであるが，サイリスタの位相制御を併用することによりタップ間の電圧を連続的に可変とすることができ，無電弧切換と同時にタップ間の連続制御が可能となる。

なお，T_{11}—T_{22} はサイリスタエレメントの電流負担を軽減するために入れられたスイッチであり，この開閉



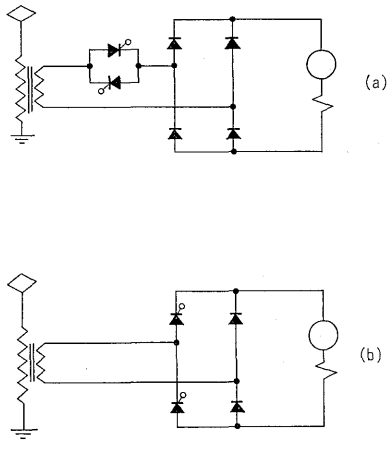
第3図　位相制御付無電弧タップ切換回路

Fig. 3. Arcless tap changing circuit with phase shifting

によりサイリスタは短時間電流定格で使用することができる。

2. サイリスタ位相制御による無接点連続制御

第4図に動作原理を示す．(a) 図は図示のごとくサイリスタを逆並列に接続し交流スイッチとして使用する場合であるが，サイリスタの位相制御を行なうことで連続制御が可能となる．(b) 図は回路動作的には (a) 図と同一であるが位相制御されるべきサイリスタを整流器ブリッジのアームの一部と共用し，混合ブリッジとなした点が異なる．(a), (b) 図とも一次側の保護用しゃ断器などを除いて主回路が完全無接点とすることが可能となり，保守点検の面から **IV. 1.** に比べ一層好ましい回路方式といえる。

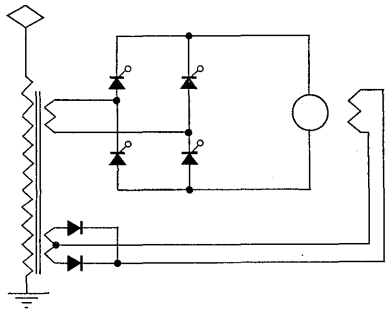


第4図　位相制御付連続制御

Fig. 4. Stepless control circuit with phase shifting

3. サイリスタによる回生制動

第5図にサイリスタを用いて力行および回生制動を行なう場合の原理を示す．純ブリッジに接続されたサイリスタ変換器は力行時は位相制御を併用した整流器として作用し，回生制動時には電源電圧により転流される他励インバータとして作動し，回生電力を電源に返還する．電動機の界磁巻線は，その特性上から通常力行時は直巻とし，制動時には図示のごとく分巻として用いられるが電子式自動制御の発達により，正確かつ速応性をもった制御が可能となったため，常時分巻接続のままとしておいて界磁電流の制御を力行時において直巻特性，制動時において分巻特性をもたせるように行なうことも可能であり，すでに実用化されている[(4)]．この方式において他励インバータで運転中，転流失敗が発生すると直流側は短絡状態となるため過電流を生ずるが，これの保護として通常高速度しゃ断器が用いられる．ただし転流失敗時に主電動機界磁を急速に逆励磁を行なうことで過電流を抑制する方法により，この高速度しゃ断器を省く方法も考えられ実用化されている[(4)]。



第5図　サイリスタブリッジによる回生制動制御

Fig. 5. Regenerative brake with thyristor bridge

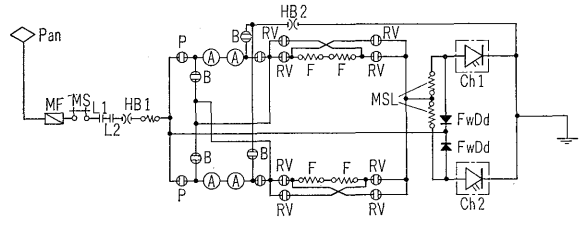
V. 直流電気車への応用

1. 架線より給電される直流電気車への応用

直流電源より駆動される電気車は直流直巻電動機の特性が車両駆動用として適している理由で古くから用いられている．一方定電圧電源に対し大容量の直流可変電圧を直列抵抗などによらずに得る方法はやはりサイリスタの実用化によって初めて可能となったといえよう．ただしサイリスタをチョッパとして用いるに際してはサイリスタ素子を高速度で回路を開閉するスイッチ素子として用いるため上述する高耐圧化，大容量化とならんで素子の高速化が当然必要とされる．現在当社において第1表に示すごとく高速形サイリスタ素子についても量産中であり，これはチョッパ用サイリスタ素子としての要求を充分満たすものである．以下現在当社にて製作した直流電気車駆動用チョッパ装置を例として直流電気車へサイリスタチョッパを適用した場合の問題点を説明する。

1) 主回路つなぎ

第6図に主回路つなぎを示す．本つなぎで明らかなごとく本装置はチョッパ装置により力行および電力回生制動を行なうもので，90kW 375V定格の主電動機を4個おのおの2個直列2回路を同時に制御している．各単位チョッパ装置は主サイリスタ，補助サイリスタ，転流コンデンサ，リアクトルなどから構成され，電源電圧の変動，電流の変化，特に小電流範囲においても充分転流可能な転流回路を構成している．この単位チョッパ装置は2個並列に置かれ，電源フィルタの容量減少および主電動機の脈流率減少を目的として両チョッパ装置は 180° の位相差をもって運転される。

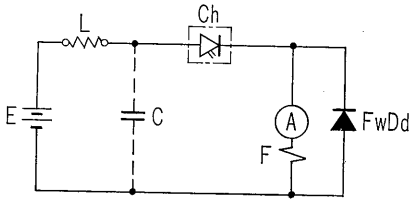


第6図　直流チョッパ車主回路つなぎ

Fig. 6. Main circuit for DC chopper

2) 電源フィルタ[5]

架線より給電される直流電気車にチョッパ装置を適用する場合，架線も含めた電源側のインダクタンスが問題となる．周知のごとくチョッパの動作原理は直流電源に対しサイリスタスイッチを高速度で開閉させ，その開閉周期または開閉時間比などを変えることにより負荷に対し平均値的にみて電源電圧より低い任意の直流電圧を与える装置であるから電源にはサイリスタスイッチの閉期間の間だけほぼ矩形波に近い電流が流れることになる．この電流波形は高調波成分を含み信号，通信線などが近くにあれば誘導により種々の障害を起こす可能性がある．この矩形波に近い電流波形は第7図に点線で示すコンデンサを設置することにより，わずかの交流分を含んだ脈動電流にすることができる．この場合図示のごとく電源側に架線などのインダクタンスがあるとコンデンサとの直列回路において共振を生ずることがある．特にチョッパの運転周波数がこの共振周波数に近い場合はコンデンサの電圧，電流が異常に増大するので危険となる．一方架線側のインダクタンスは車両の位置によって変化するものであるから，この共振周波数も当然変化するが共振をさけるため，架線側のインダクタンスに直列に比較的大きいリアクトルをそう入し，そのリアクトルとコンデンサの共振周波数をチョッパ運転周波数の数分の1位に設定しておけば，架線側のインダクタンスが場所により減少し，フィルタの共振周波数がチョッパの運転周波数に近づくことは防止できる．なお通信誘導障害の目安とされる等価妨害電流 J_P をたとえば架線電流 100A 当たり 0.3A 程度に押さえるためにはこのフィルタの共振周波数は必然的に低くなりチョッパ運転周波数の約10分の1程度となる。



Ch：チョッパ
L：リアクトル
C：コンデンサ
E：電源
A，F：負荷電動機
FwDd：フライホイールダイオード

第7図　フィルタ原理図

Fig. 7.　Filter circuit

3) 制御および保護方式

チョッパによる電圧制御の方式には周知のごとく種々の方法があるが，上述するごとく架線より電力の供給を受け，また波形ひずみ防止用フィルタが設置される場合にはチョッパ運転周波数をフィルタ共振周波数より離れた周波数で固定する方が望ましく，このためには一定周波数でチョッパ閉期間の時間幅を可変とする方式が最も適している．したがって当社の場合はこの方式により電圧制御を行なっている．チョッパ装置の実用化に当たっては，主回路に使用されるサイリスタ素子の高速大容量化，高耐圧化とならんで制御および保護回路の使用素子，回路構成についても高信頼度，高速応性，ノイズに対する安定性，小形軽量化などが絶対的な必要条件とされる．当社において製作したチョッパ装置においては限流値制御，過電圧過電流の保護のための検出要素としては高速応性をもった磁気抵抗素子[6]を用い DCPT および DCCT を構成して使用している．さらに増幅器および論理判断要素はすべてシリコントランジスタを基本としたトランジダイン，F-MATIC[7]を用いチョッパ車に必要とする信頼度，速応性，ノイズに対する安定性を充分満足している。

2. バッテリ車への応用

近年，自動車の急速な増加に伴ない，都市部では自動車の排気ガスや騒音による公害問題が大きくクローズアップされ，本格的な対策が検討され始めると同時に，サイリスタの大容量化実現により，効率のよい制御装置が可能となり，電気駆動による方式のものが注目を浴びてきた．当社においてもこれらバッテリを電源とする電気自動車ならびに産業車用電装品を試作開発し，現在好調裏に運転中である。

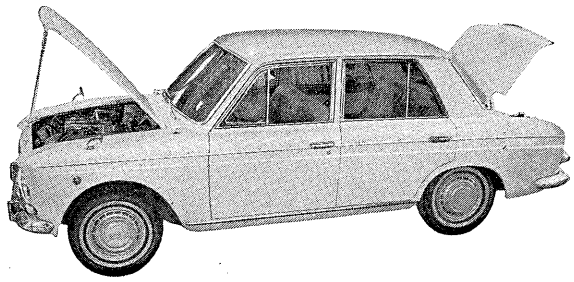
1) 電気自動車

サイリスタチョッパ制御方式による電気自動車を，古河電池と共同で試作完了した。

(1) 試作車の概要

試作車は小形ガソリン乗用車を改造したもので，エンジンおよび関連部品を取りはずし，前部エンジンルーム内に 9 kW 直流電動機とサイリスタチョッパ，制御器，後部トランクルーム内に特殊軽量形の鉛蓄電池を搭載してある。

操作はノークラッチ方式を採用し，前後進切換も電気スイッチにより行ない，速度調整もアクセルのみでできるようにしてあるので，運転がきわめて容易であ



第8図　バッテリ式電気自動車

Fig. 8.　Electric automobile with battery

る。

また走行中アクセルをはなすと自動的に回生ブレーキ（エンジンブレーキ相当）がかかり運転の安全を期すとともに制動エネルギを蓄電池に回収し走行距離をのばしている。

(2) 駆 動 電 動 機

通常の直流直巻電動機と異なり，回生制動，界磁弱め，前後進切換の操作が容易で素速く，確実に行なうようにするため，界磁巻線に特別なくふうを施し2巻線構造としている．また，速度がある値以上になると自動的に界磁弱めを行なうよう，簡単な回転検出器が電動機に取付けてあり，高速性をもたせ，低速加速時の電力消費を軽減するように考慮されている。

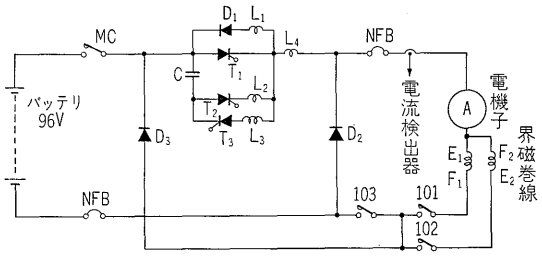
(3) 制 御 装 置

制御装置の主要部であるサイリスタチョッパ装置は振動形二重反転方式を採用，負荷電流の変動に対しても安定に動作を行なう。

制御方式についてはアクセル踏角度に応じて電動機印加電圧を指令し，可変周波数方式により，始動時の電動機電流変動を抑制し，高速度域においては，制御周波数低減により電圧利用率の向上と効率上昇を図っている。

保護装置としては転流失敗保護はもちろんのこと，転流失敗に至る前の急しゅんな電流変化に対しては1サイクル以内にチョッパ停止を行ない安全性に万全を期している。

第9図に本装置の回路接続を示す。



第9図　電気自動車主回路接続（回生付）

Fig. 9. Main circuit of electric automobile with regenerative brake

(4) 速 度 調 節 器

アクセルに連動した速度調節器は磁気抵抗器を利用した無しゅう動，無接点方式を開発し，機械的振動による切損や，摩耗などによる接触不良がまったくない耐久性の良いものを使用している。

(5) 試作車の性能

最 高 速 度：70 km/h

経 済 速 度：40 km/h

登 坂 能 力：25%こう配のとき 10 km/h

5%こう配のとき 35 km/h

バ ッ テ リ：150AH 96V

乗 車 定 員：5名

1充電走行距離：70km

直 流 電 動 機：9kW 85V 2,000rpm

2) 産業車用フォークリフト

フォークリフトは，運転操作において始動時の微速運転，前進，後進時のクィックリターンなど使用条件は過酷である。

これらの使用条件を充分に満足し，しかも，装置ならびに保守の簡易化のため各部品のユニット化を図り，制御回路もオール無接点方式を採用している。

また，装置においてはモールド化により，耐湿，耐振性をもたせ，信頼性の向上を図っている。

現在フォークリフト用としては1t車，1.5t車用電気品を完成している。

3) その他の方式

バッテリ車駆動電動機としては従来より使用されている直流直巻電動機に代るものとして，ブラシなし，無整流子方式によるものを開発中である。

VI. 補助回路，制御回路へのサイリスタの応用

1. 補助回路用サイリスタインバータ

直流電気車両の補助回路および制御回路用電源としては最近の高耐圧高速形素子の開発により静止形高圧サイリスタインバータが実用化されている。

車両用のサイリスタインバータの特長としては，

(1) 入力電圧の変動が大なること。

(2) 電源側より侵入するサージが大なること。

(3) パンタグラフなどの集電部における離線，セクション通過，短時間の電源中断が比較的ひんぱんに発生すること。

(4) 小形軽量化。

(5) 電気車内外のノイズに対し安定であると同時に他機器に対しても有害なノイズを出さないこと。

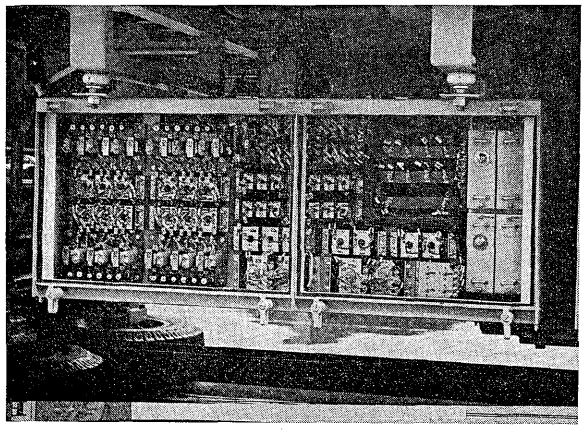
などである．当然上記条件においてインバータは安定に動作する必要があるほか，経済性なども無視し得ない。

以下に当社における車両用高圧サイリスタインバータの一例として最近製作納入せる単相9kVA，車両用サイリスタインバータの概要を紹介する。

第2表　サイリスタインバータ要目表

Table 2. Ratings of high tension thyristor inverter

方式		サイリスタブリッジ式
定格	容量	9 kVA
	入力電圧	DC 750V
	出力	AC 100V 50Hz



第 10 図　電車用高圧サイリスタインバータ
Fig. 10. High tension thyristor inverter for electric rolling stock

要目は第2表に示すとおりであるが，上述する車両用としての特殊条件を考慮して制御回路，保護回路については種々の新方式を採用してある。

なお外形を第 10 図に示す。

2. サイリスタを用いた制御回路の無接点化

周知のごとく制御回路の無接点化に関しては，トランジスタなどの半導体素子および可飽和リアクトルなどを用いて種々の回路が考案され，実用化されているが本項においてはサイリスタを用いて制御回路を無接点化する方式について紹介する。

現在の半導体素子の技術レベルから考えると，制御回路に使用される中小容量の素子については耐圧，容量の上からは充分使用可能であり，したがって制御回路を無接点素子にて構成する場合考慮すべき点は

(1) 経済性（製作費，保守費など）

(2) 過電圧，ノイズなどに対する安定性

(3) 寸法，重量などの小形軽量化の可能性

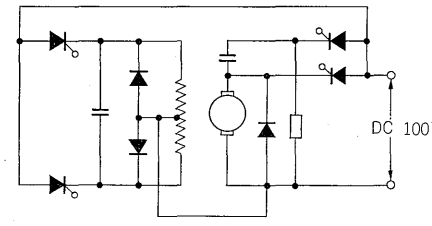
などである。

当社においては早くから制御回路の無接点化についてその実用化を行なってきているが，ここでは旧来の直流電車などで比較的保守を要していたカム電動機用短絡継電器回路をサイリスタにて構成した例を紹介する。

要目は第3表に回路つなぎを第 11 図に示す．なお本装置は日本国有鉄道・東海道新幹線軌道試験車(B編成)に搭載され昭和 37 年より今日まで7年あまり問題なく運転されている．従来サイリスタを直流電源回路にスイッチング素子として用いることはサイリスタ素子に自己消弧能力がないため，誤動作を起こしやすいなどからあまり好まれない傾向にあったが，本方式の長期間の良好な運転実績からみてもサイリスタをスイッチング素子として直流回路に使用することになんらの問題がないことが明らかにされた。

第3表　直流無接点カムモータ制御回路要目
Table 3. Ratings of control circuit for pilot motor

方　式	界磁切換式　正逆転制御
電　源	DC 100V
負荷電動機	120W　DC 100V　二重界磁付
制御回路	DC 100V



第 11 図　直流無接点カムモータ制御回路
Fig. 11. Circuit diagram for controlling pilot motor with thyristor

参考文献

(1) 森・加藤：加圧接触形シリコン整流素子
富士時報　**38**, No. 3

(2) 田原：800A 平形高耐圧シリコン整流素子
富士時報　**41**, No. 9

(3) Werner Stein: Stufenschalter mit Thyristorlastumschalter für Wechselstrom-Triebfahrzeuge
Siemens-Z 39 (1965), H. 4, S. 269

(4) Robert Fischer und Gerhard Scholtis:
Die Thyristorgesteuerte Nutzbremse im Triebwagen ET 45.01 der Deutschen Bundesbahn
ElektrischeBahnen 1968 H. 6/7, S. 136/154

(5) Konard Heintze und Rudolf Wagner:
Elektronischer Gleichstromsteller zue Geschwindigkeitssteuerung von aus Fahrleitungen gespeisten Gleichstrom Triebfahrzeugen ETZ-A Bd 87 1966 H. 5, S. 165

(6) 難波：InSb-NiSb共晶体を用いた磁気抵抗素子
富士時報　**39**, No. 6

(7) 桜木・竹村・金田：富士トランジスタディジタル制御素子標準系列 F-MATIC　富士時報　**41**, No. 7, 8

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。