

照明回路における半導体応用

Application of Semiconductors in Lighting Circuits

遠 藤 武 良*
Takeyoshi Endô

森 山 良 一*
Ryoichi Moriyama

内 容 梗 概

半導体の照明回路への代表的な応用としては、トランジスタインバータを用いたけい光灯点灯装置、SCR (Silicon Controlled Rectifier) による調光装置、CdS 光導電セルによる自動点滅器などがある。本稿はそれらについて述べている。

半導体を用いない従来の方式に比較すれば、これらはいずれも性能において格段とすぐれ、また小形、軽量化においても顕著な効果をもたらしている。今後半導体のいっそうの進歩につれ、さらに新しい応用面の開発、発展が期待される。

1. 緒 言

ここ数年来の半導体工学の発展は目ざましく、ダイオード、トランジスタなどは、すでに広く実用化され、その高性能と、安定性が実証されている。

その後、さらに大容量のトランジスタおよびSCR (Silicon Controlled Rectifier) が開発されて、大電流、高電圧を制御できるようになった。これらはいずれも直流電力制御用であるが最近になってSSS (Silicon Symmetrical Switch), TRIAC (3電極、交流制御素子) など交流電力を制御できるものも現われてきている。

これら半導体製品は照明回路にも用途が多く、その採用によって小形、軽量化あるいは高効率、長寿命化が実現されている。すなわちその代表的な例では、トランジスタけい光灯点灯装置はバス、鉄道客車の照明用として、SCR 調光装置は劇場、テレビスタジオなどの舞台照明用として、またCdS 光導電セルの自動点滅器は街路灯用として実用化されている。本文ではこれらの現状について述べる。

2. トランジスタ式けい光灯点灯装置

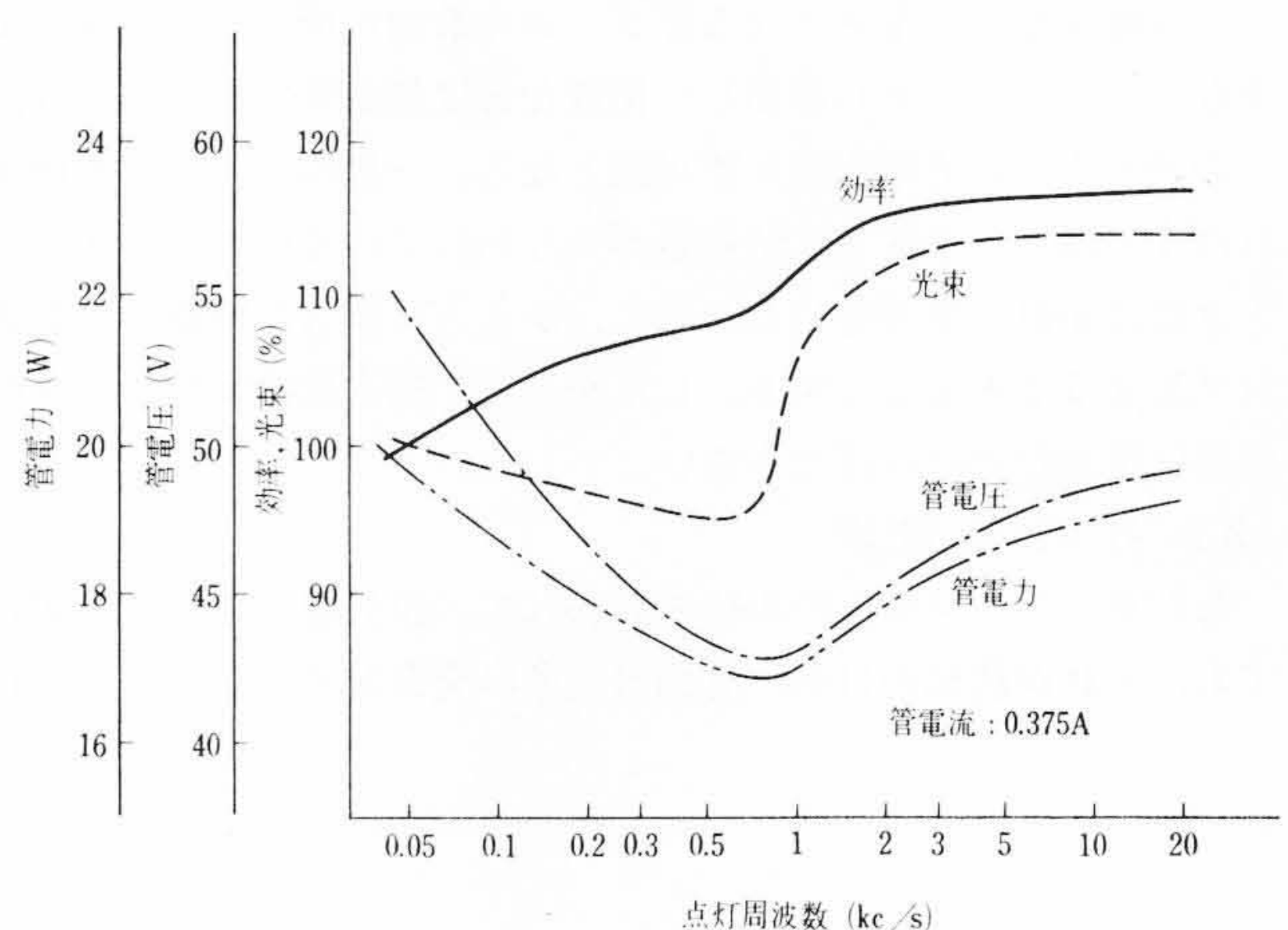
バス、鉄道客車などの照明用電源には低電圧の蓄電池が使われているが、このままの電圧ではけい光灯を点灯させることができず、かつ直流では効率が悪くなるため交流に変換し昇圧する装置が必要である。従来は、回転変流機、振動片式変換器などが使用されてきたが、これらは形、重量、騒音が大で、短寿命で保守に手間がかかるなどいずれかの欠点を持っている。これにかわってトランジスタを用いた静止形インバータを使用すれば、点灯装置は小形、軽量、高効率化され、保守も簡単で従来の方式よりはるかにすぐれている。

一般にけい光ランプは点灯周波数によって、管電圧、管電力、光束、効率が変わってくる。その一例として20W けい光ランプの周波数特性を第1図に示す。本図から周波数5kc/s程度以上では50c/sの場合に比べて効率が約15%増加することがわかる。この効率の点から点灯装置の周波数を開発当初には7kc/s程度としたが、騒音が問題となりその後15~20kc/sに高められた。

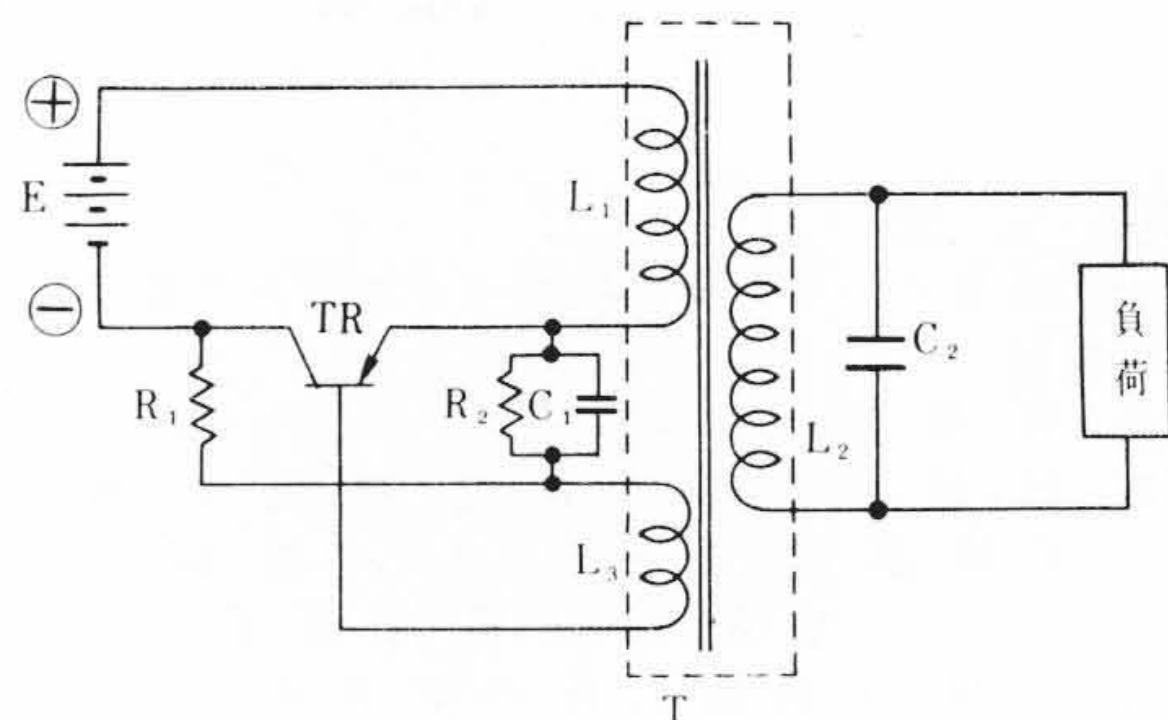
一方本方式のものは容量の点で制約され、当初20W以下のけい光灯に限られていたが1962年には40W用も開発、実用化され、現在では鉄道客車、ディーゼル車およびバスなどの照明用として広く採用されている。

なお、さらに大容量のけい光灯の高周波点灯装置としてはSCRインバータを用いることになる。すでにアメリカでは30kW SCRインバータによりビル全体のけい光灯を3kc/sの高周波で点灯し、経済的に大きな効果を得たと報告している。

* 日立ランプ株式会社小田原工場



第1図 20Wけい光灯の点灯周波数特性
(注) 光束、効率は50c/sの場合を100%とする。

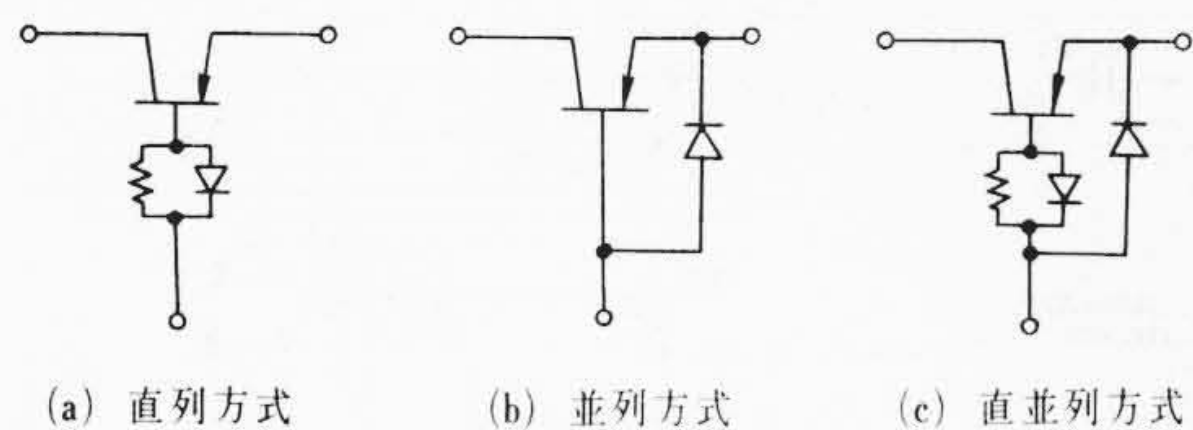


第2図 トランジスタインバータの基本回路

2.1 基本回路の動作原理⁽¹⁾

第2図にトランジスタインバータの基本回路を示す。図においてEは低圧直流電源、TRはトランジスタ、Tは L_1, L_2, L_3 のコイルを同一鉄心上に巻いた発振トランス、 R_1, R_2 はバイアス抵抗、 C_1 はバイパスコンデンサ、そして C_2 は波形改善コンデンサである。以下簡単にこの回路の動作を説明する。

直流電圧Eが印加されると、TRのベースは抵抗 R_1, R_2 によってエミッタに対し負電位となり、TRは導通してエミッタ電流が L_1 コイルに流れ始める。その結果 L_3 に電圧が誘起され、これによりベースに駆動電流を増加させるとエミッタ電流が増大し、トランジスタはスイッチインの状態となる。ついでTRの飽和によりエミッタ電流の増加が止まると L_1 の電流変化がなくなり L_3 の誘起電圧は消失する。したがってエミッタ電流も減少する。エミッタ電流が減少し始めると、各コイルの誘起電圧は極性を反転し、ベースはエミッタに対して負から正電位に変わりエミッタ電流は流れずトランジスタ



第3図 ダイオードそう入方式

第1表 各ダイオードそう入方式の性能比較

項 目	直列ダイオード	並列ダイオード	直並列ダイオード
スイッチング特性	やや悪い	良い	良い
エミッタ耐圧	やや保護する	保護する	保護する
インバータ効率	良い	やや悪い	良い
電圧変動特性	良い	やや悪い	良い
経済性	やや有利	有利	やや不利

はスイッチオフの状態となる。以下同様の過程を繰り返して自励発振を行ない負荷に交流電力が供給されることになる。

2.2 実用化における諸要項

2.2.1 インバータ回路

けい光灯用トランジスタインバータとしては特に下記の諸点に考慮の必要がある。

- (1) 発振周波数
- (2) ベース駆動方式
- (3) トランジスタの並列使用方法

(1)の発振周波数については、本装置が客車、バスなどの照明用であるから発生騒音を極力低くするように選定しなければならない。このためには周波数を非可聴域まで高めることが一つの有力な方法である。しかし他方高周波特性のすぐれた電力用トランジスタは製作が困難であること、およびスイッチング損失が周波数に比例して増大し、回路効率が低下することからは周波数の低いほうが望ましい。したがって、この両方から適当な周波数を選定する必要に迫られ約 15 kc/s 程度が採用されている。

(2)のベース駆動方式については、ベース駆動電圧をエミッタ、ベース間ゼナー電圧以上に大きくして、スイッチング特性の改善を図る必要があるが、この高駆動電圧に起因するトランジスタの破壊防止としてシリコンダイオードを使用した数例について説明する。

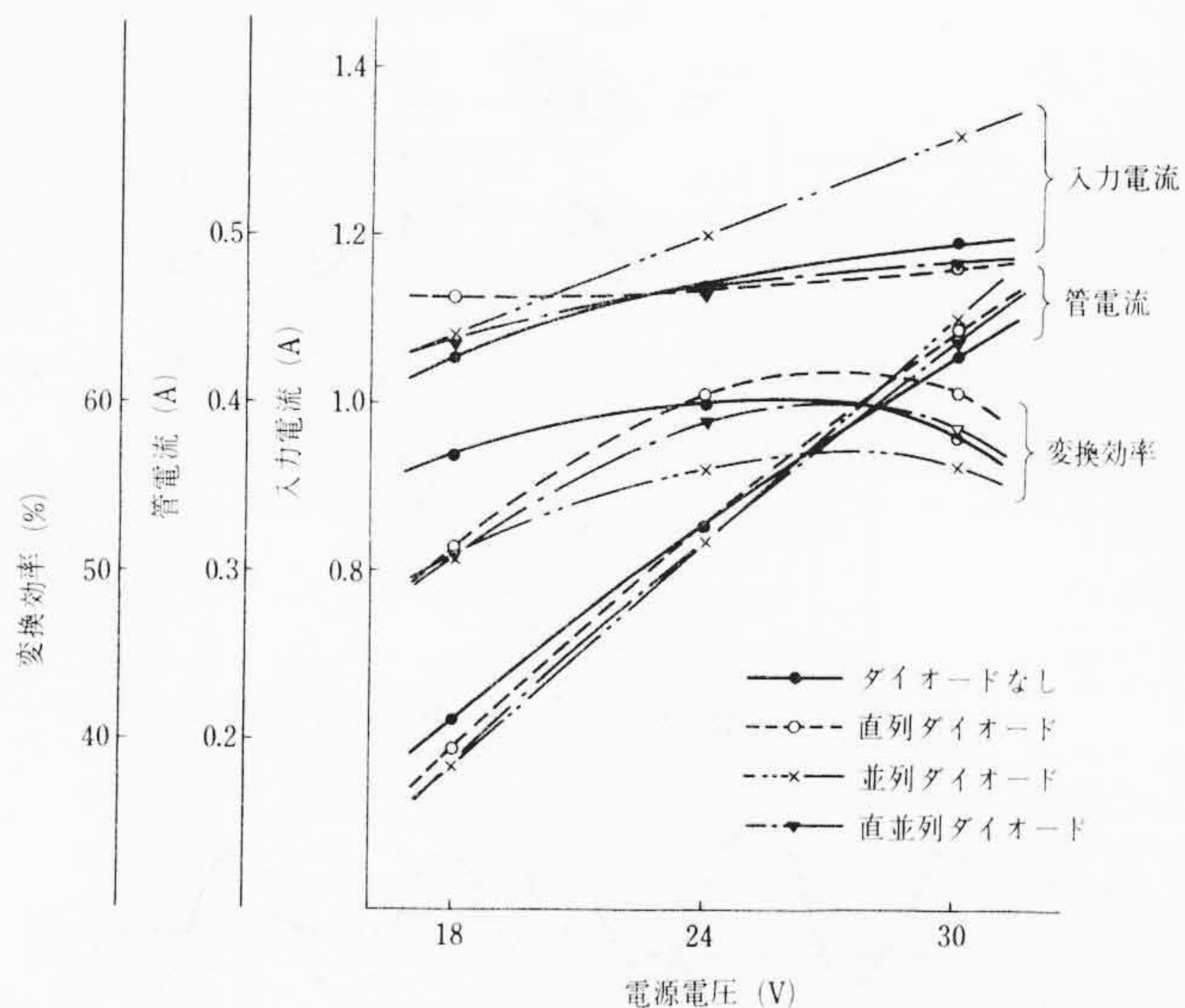
ダイオードの使用には第3図に示すような3方式があり、その性能比較は第1表に示すとおりである。ダイオードをそう入しない場合および上記3方式の電圧特性を一例について示したのが第4図である。これらの方式のうちでは、一般に効率および電圧変動特性にすぐれた直列ダイオード方式が有利であるが、後述するようにトランジスタの並列使用を行なうものでは、スイッチング特性を重視して並列ダイオード方式が採用されることがある。

(3)のトランジスタの並列使用は、装置容量の大きい場合に高容量のトランジスタでは高価になるのでこれを避けるために行なわれるものである。

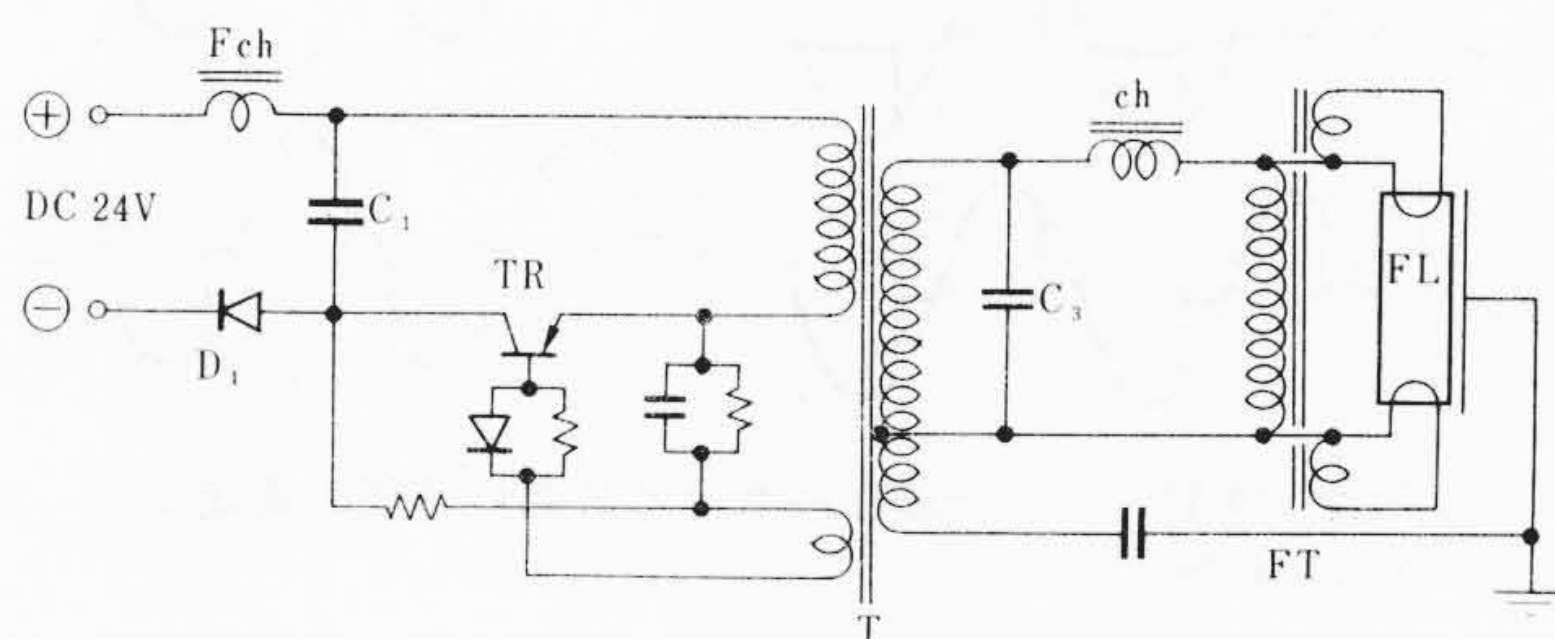
トランジスタの並列使用については、その特性のばらつき、特に電流増幅率 h_{fe} の違いによる負荷の不平衡に考慮を払わなければならない。この不平衡を補正するためには、

- (i) h_{fe} の値の近いトランジスタを2個1組にして使用する。
- (ii) 回路に抵抗をそう入して h_{fe} に応じて調整する。

の2手段があるが、(ii)の方法はトランジスタの交換を行なうたびに抵抗を調整する必要があるので(i)の方法のほうが簡便で一般に採用されている。



第4図 20Wトランジスタけい光灯における各種ダイオードそう入方式の電圧特性



第5図 20Wトランジスタけい光灯の点灯回路

2.2.2 けい光灯点灯回路

けい光灯の点灯周波数を前述のように 15~20 kc/s とすると、起動に際して、一般のグロースタート回路（起動時、フィラメント予熱回路をグロースタートによって入、切し、放電安定用チョークコイルのキック電圧でランプを点灯させる回路）を使用できないので、ラピッドスタート回路（点灯回路中にフィラメント予熱回路を有し、電源投入後即時にランプを点灯させる回路）を採用する必要がある。またインバータの出力電圧およびフィラメント予熱電圧を、その周波数におけるランプの起動特性に応じたものとしなければならない。なお起動補助用としてランプに近接して導体を設け、起動電圧をなるべく低くし、かつ一定値にそろえる必要がある。

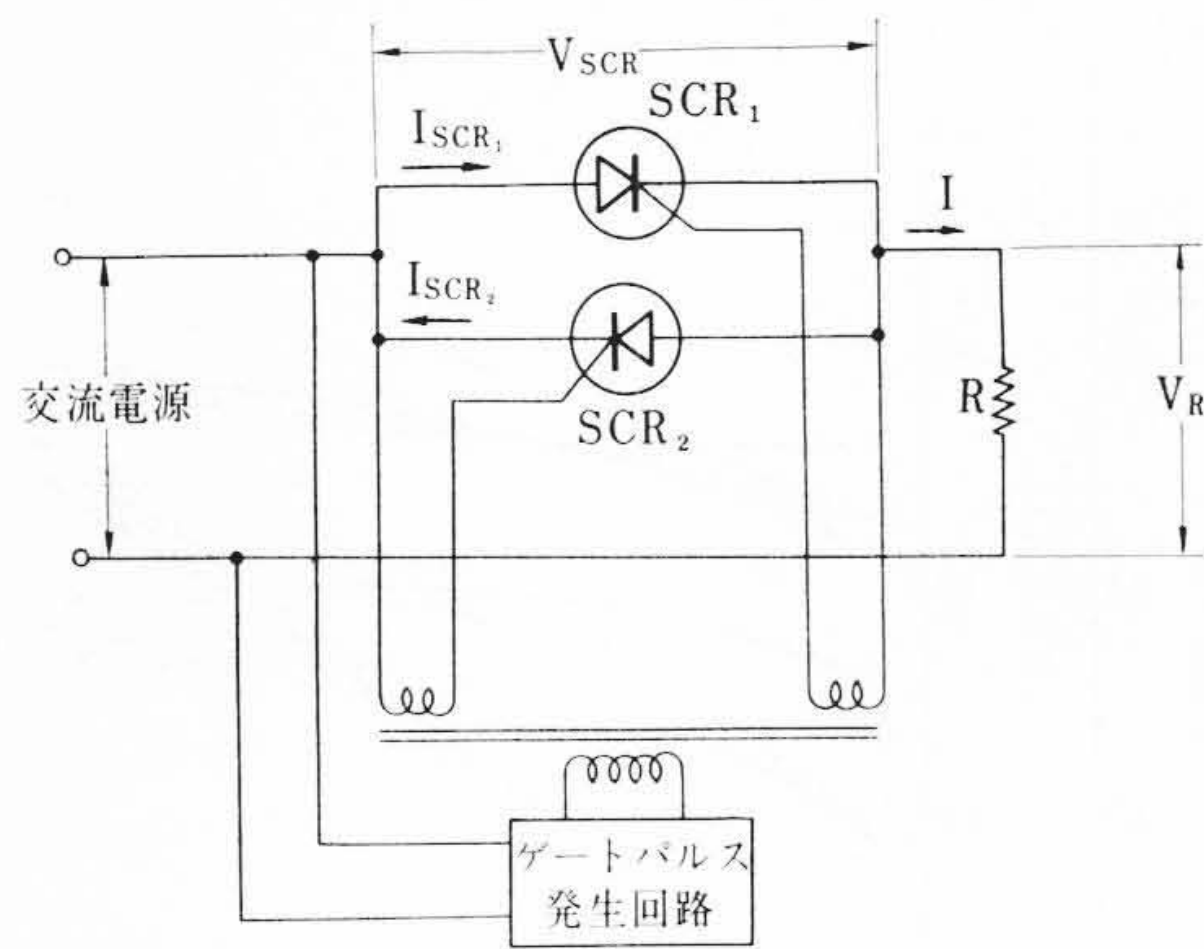
2.3 製品例

以上の諸点を考慮した 20 W ならびに 40 W けい光灯がバスおよび鉄道客車に用いられている。第5図は 20 W けい光灯の点灯回路を示すものである。図において F_{ch} 、 C_1 はラジオ雑音防止用のフィルタ素子、 D_1 は電源極性の誤接続によるトランジスタの破壊を防止するダイオード、 TR はトランジスタ、 T は発振トランス、 Ch は放電安定用チョークコイル、 C_3 は波形改善用コンデンサ、 FT はフィラメント予熱トランス、 FL はけい光ランプである。

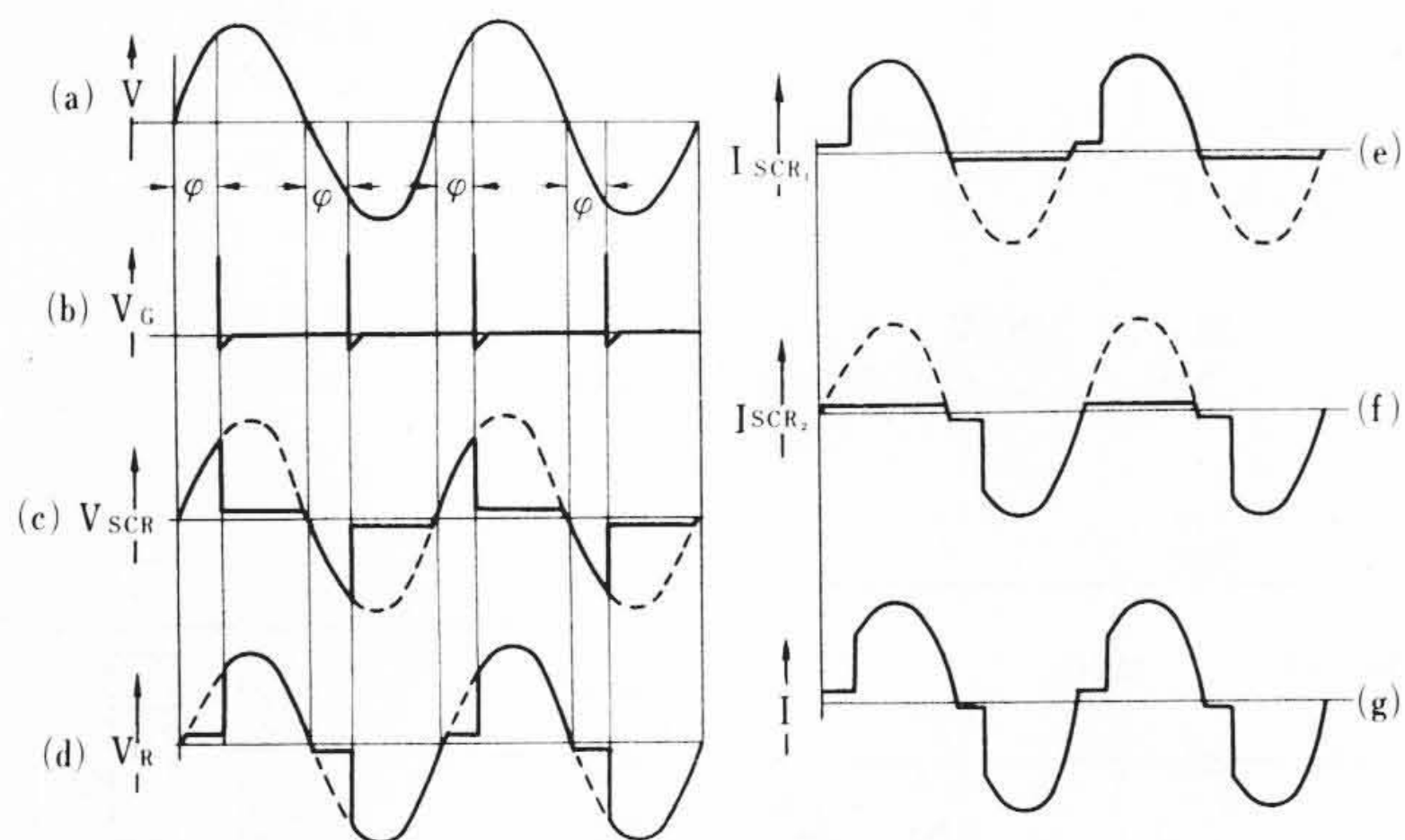
3. SCR による調光装置

劇場やテレビスタジオの舞台照明における調光装置の効果は大きいものであるが、最近ではホテル、レストラン、ホールなどにおいてもそのときどきのふん囲気を変えるために調光装置を使用することが多くなってきた。

調光方式は 19 世紀の終わりの電球回路に直列に水抵抗をそう



第6図 SCR スイッチ動作回路



第7図 SCRスイッチ動作における各部の電圧、電流波形および位相関係

入した方式から可変直列抵抗式、可飽和リアクトル式などを経てオートトランス式、磁気増幅器式、サイラトロン式へと進歩してきた。しかし、オートトランス式では操作が不便なうえ大形となるので総合経済性に劣り、また磁気増幅器やサイラトロン式においては調光素子の電圧降下が大きく、現在実用化されている SCR 方式に比較すれば大形という欠点もある。

SCR 調光装置は全静止形で、格段に小形となり、電気的に制御されるため複雑な照明手法も容易となり、また制御電力は小さく、効率は高く保守は簡単になるなど、現在ではもっとも進歩した調光方式といえるものである。

3.1 SCR 調光の原理

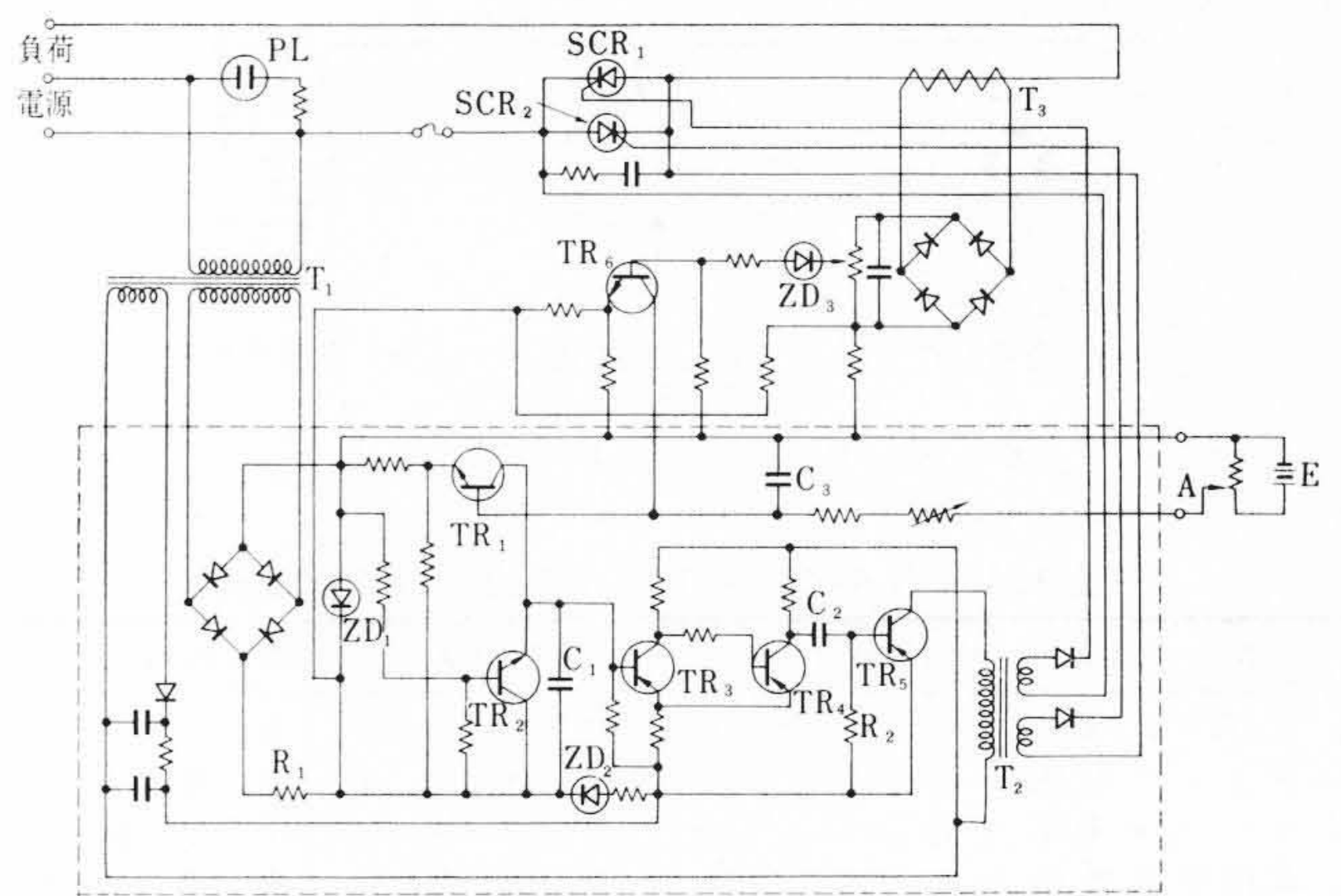
3.1.1 基本回路

第6図は SCR のスイッチ動作の基本回路、第7図はゲートパルス（制御パルス）印加時点の位相を電源電圧零の瞬時より φ だけ遅らせた場合の、回路各部の電圧電流波形、および位相関係を示すものである。(a)は電源電圧、(b)はゲートパルス電圧、(c)は SCR の陽極陰極間に印加される電圧、(d)は負荷端子電圧、(e)は SCR₁ の陽極陰極間に流れる電流、(f)は SCR₂ の陽極陰極間に流れる電流、そして(g)は負荷電流である。本図からわかるようにゲートパルスの位相差 φ を $0 \sim 180$ 度の範囲に変化させれば、各半サイクル間の負荷電流休止期間は $0 \sim 180$ 度まで変化し、円滑な調光が得られることになる。

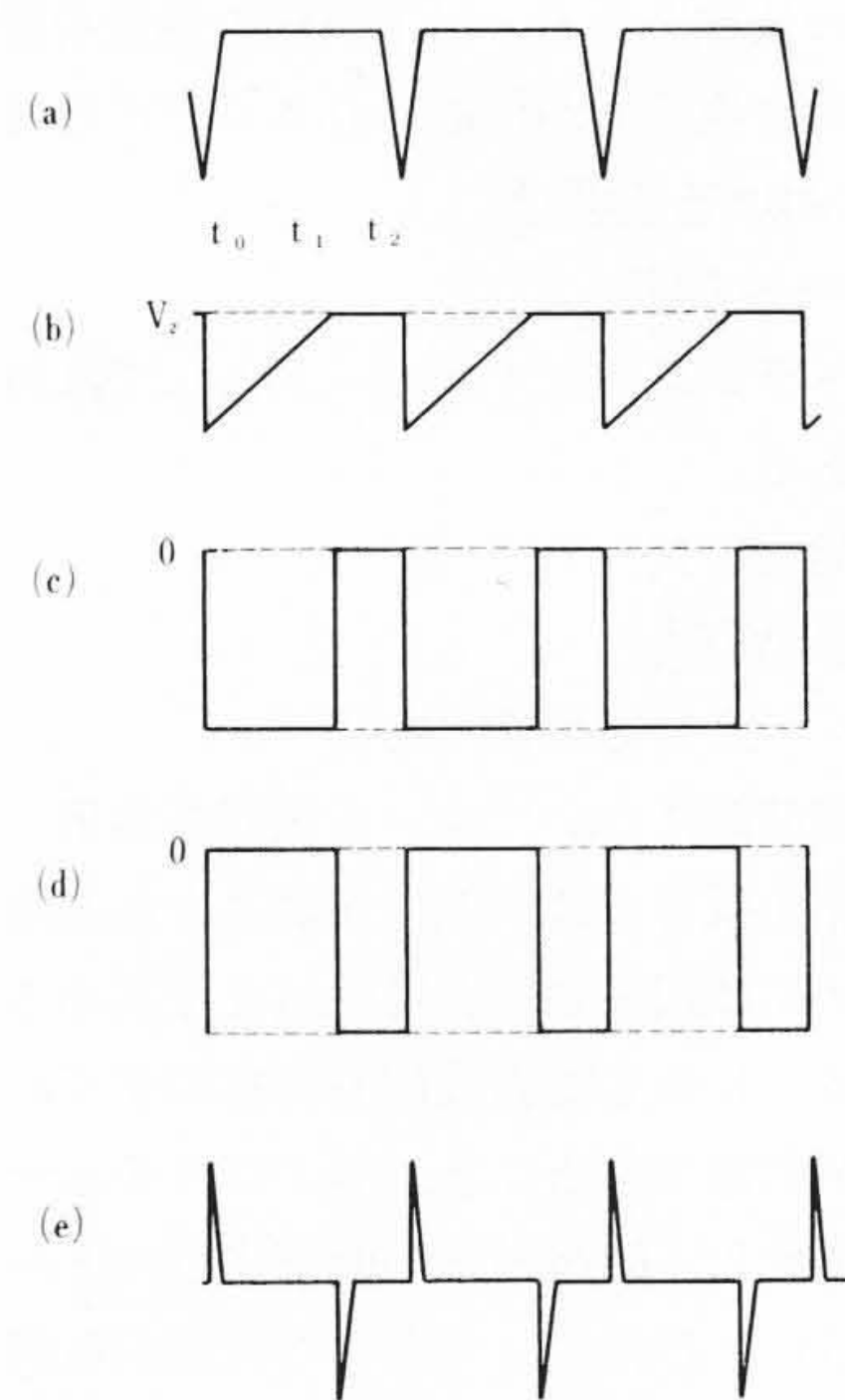
3.1.2 パルス移相回路

パルス移相回路に必要な条件には次の項目がある。

- (1) SCR 点弧特性のばらつき、および温度の影響を少なくするために、パルスの立ち上りを急しゅんにすること
- (2) 周囲温度、電源電圧にパルス位相が影響されないこと
- (3) ゲートパルスの高さは位相に関係なく常に一定であること
- (4) 各半サイクルにおけるゲートパルスの位相が一致している



第8図 SCR 調光ユニット回路図



第9図 パルス回路各部の電圧波形

こと

(5) 電力回路とは絶縁されていること

第8図は調光ユニットの回路例で、破線でかこむ部分が上記の諸条件を満足するパルス移相回路である。なお第9図はその各部の電圧波形を示すもので、(a)は ZD₁ の端子電圧、(b)は C₁ の端子電圧、(c)は TR₃ のエミッタ・コレクタ間電圧、(d)は TR₄ のエミッタ・コレクタ間電圧、(e)は R₂ の端子電圧である。以下この回路の動作を簡単に説明する。

まず電源電圧を両波整流し、抵抗 R₁ とゼナーダイオード ZD₁ によって第9図(a)のような台形波電圧を得る。コンデンサ C₁ はこの台形波電圧によって TR₁ をとおして充電されるが、C₁ の電圧は TR₁ の定電流特性により第9図(b)のように直線的に上昇する。そしてこの充電電圧がゼナーダイオード ZD₂ のゼナー電圧 V_Z になったとき、すなわち時間 t₁ において ZD₂ は導通し始め、TR₃ のベースに電流が流れる。これによって TR₃ と TR₄ とよりなるトリガー回路が動作し、C₂ と R₂ よりなる微分回路をとおして取り出される出力は第9図(e)のような時間 t₁ において発生するパルスとなる。このパルスを TR₅ により増幅し、パルストランス T₂ を介して主回路の SCR ゲートに印加する。時間 t₂ で電源電圧が零となると、TR₂ のベースはエミッタに対して正電位となるため、導通して C₁ の電荷が放電される。以下同様の動作を繰り返し半サイクルに1個ずつのパルスが得られる。一方第8図の A 端

子をしゅう動することで TR_1 のベース電流、したがってそのコレクタ・エミッタ間の抵抗値を変えれば C_1 の充電時定数が変わる。これによってゲートパルスの移相は簡単、円滑かつ確実にこなされることになる。

3.1.3 SCR 白熱電球調光

白熱電球の調光には第6図の基本回路をそのまま応用することができる。すなわちこの調光方式ではパルス移相回路は第9図(a)に示す台形波電圧で駆動され、所要パルスは波形の平坦部のみで得られるので、無調光時でもゲートパルスの位相は電源電圧の各半サイクルの始めよりわずかに遅れることになる。このため負荷電流には各半サイクルの始めに休止期間が生じ、電球の明るさは完全に100%とはならないが、この低下を3%以下にすることができる。これとSCR自身の電圧降下分を加えても出力低下は5%以下である。必要に応じ電源変圧器のタップを高めておけばよい。また電球負荷の場合には、フィラメントの冷抵抗によるスイッチ投入時のラッシュ電流に対して特に考慮せねばならない。そのためSCRの容量に余裕をもたせてはあがあるが、さらに信頼度を高めるために次のような保護回路を設けてある。

(1) サージ電流に対する保護

本保護は負荷を接続した状態で、調光制御直流電圧を印加してSCRをスイッチインしたときのラッシュ電流防止を目的としたもので、第8図に示すように直流制御回路に並列コンデンサ C_3 を接続すればよい。すなわち、 C_3 の端子電圧は徐々に上昇しながら TR_1 のベースに加わるので負荷電流は導通角の狭い状態から設定した広い状態へと徐々に広がっていくことになり、ラッシュ電流が押えられる。

(2) 過負荷電流に対する保護

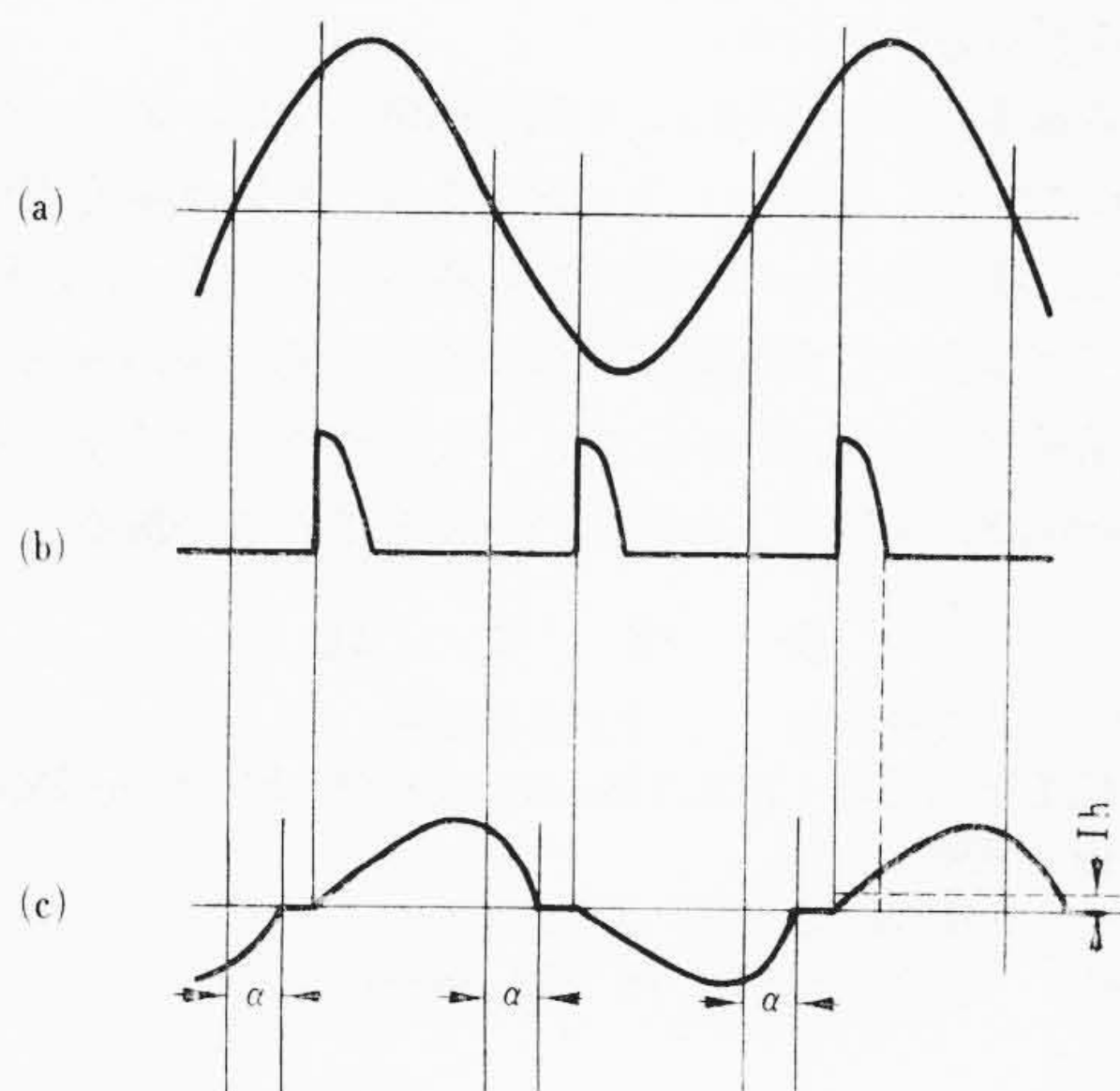
誤って過負荷が接続された場合の過電流保護としては自動的に回路電流を制限する方式がとられている。第8図の変流器 T_3 によって負荷電流に比例した電圧を検出、整流し、 ZD_3 をとおして TR_6 に過負荷信号を送ると、 TR_1 のベース電流は TR_6 に分流され、 TR_1 は等価的に高抵抗となるので、ゲートパルス位相が遅れ負荷電流は定格以下に制限される。

(3) サージ電圧に対する保護

これは外部からのサージ電圧によるSCRの誤動作、破壊を防止するもので抵抗とコンデンサよりなるサージ電圧吸収回路をSCRと並列に接続することによって行なわれる。

3.1.4 SCR けい光灯調光

けい光灯調光の場合も負荷と直列にSCRを接続し、負荷電流の導通角を変えることにより調光ができる。しかしけい光灯の場合



第10図 けい光灯調光の電圧電流波形

には電球の場合と異なり、フィラメントの冷抵抗によるスイッチ投入時のラッシュ電流がないため、複雑な保護回路を必要としないが、ゲートパルス回路については次の考慮が必要である。第10図はけい光灯負荷の場合の電圧、電流波形を示すもので(a)は電源電圧、(b)はゲートパルス、(c)は負荷電流である。本図からわかるようにけい光灯負荷は誘導性であるため負荷電流の位相は電圧より α だけ遅れる。したがってけい光灯の調光では負荷電流を0~100%に変化させるには、ゲートパルス位相を第10図の負荷電流が零となる位相 α から180度の範囲に変えることになる。またゲート電流が流れている間に、負荷電流の瞬時値がSCRの保持電流 I_h に達しないと、SCRは再び非導通状態にもどるおそれがあるためゲートパルスの幅を十分広くすることが必要である。

第11図はけい光灯調光の回路例であるが、低光束域での放電開始を容易にするためにフィラメントトランスを設けて、けい光灯のフィラメントを常時十分加熱するようにしてある。

3.2 実用上の問題

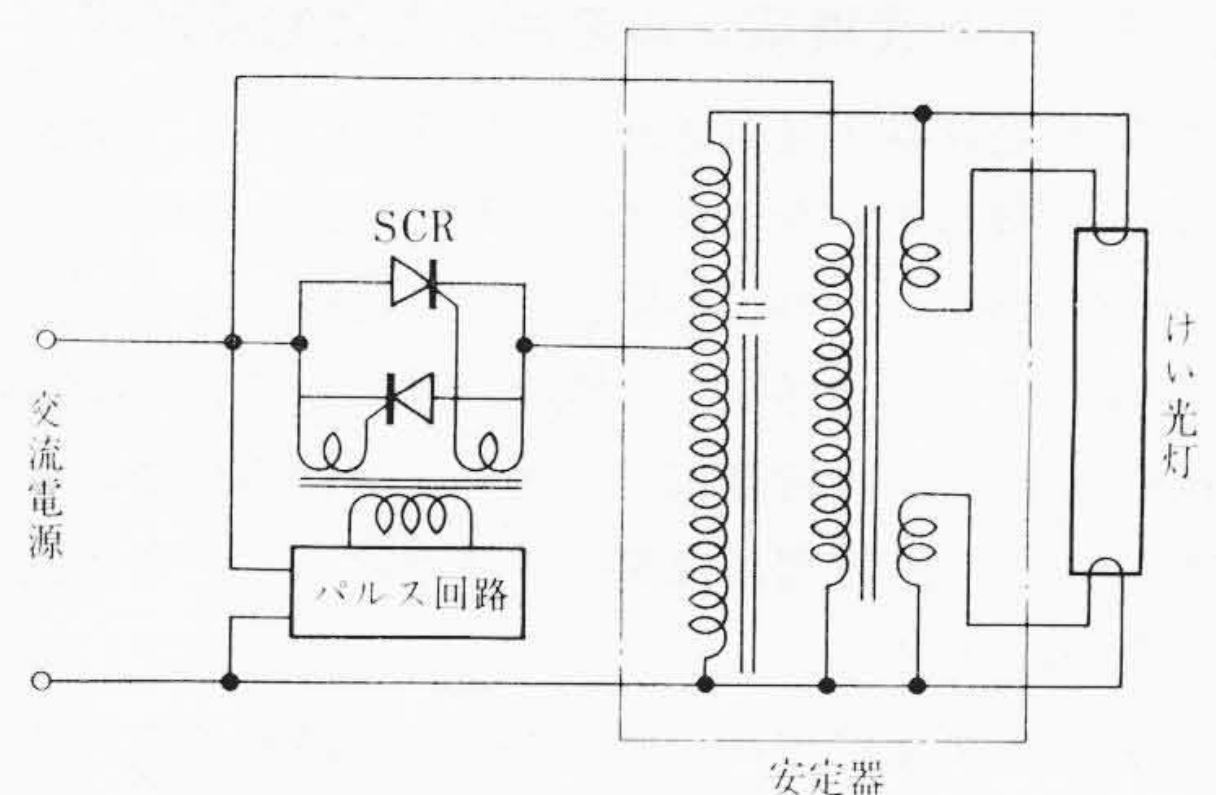
3.2.1 誘導障害

SCR方式での回路電流は調光時に、電流休止期間のある立ち上りの急しゅんな波形となるので、第12図のように電源電圧がひずむ。このため照明回路と同一電源に接続される通信機器が障害を受ける。また照明回路の負荷電流が大きいときには負荷配線からの誘導雑音も問題となる。特にテレビスタジオに使用した場合SCR調光装置は映像および音声回路関係に障害を及ぼす。電圧のひずみによる障害は調光装置の電源側に1mH程度のインダクタンスを接続することによってほとんどなくすることができる。負荷回路からの誘導による障害は、上述のインダクタンスによっても軽減できるが、これだけでは完全とはいえないので、照明負荷配線と音声回路配線との間を10cm以上あける必要がある。

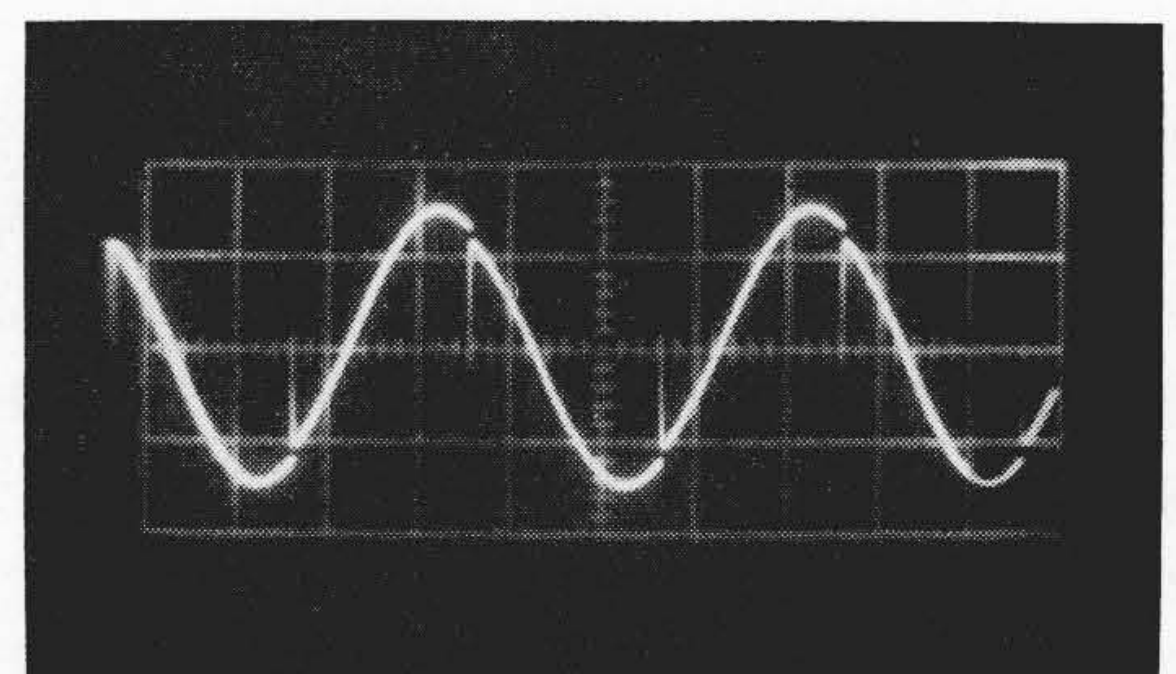
3.2.2 調光操作⁽³⁾

SCR調光方式での調光操作は直流制御電圧を可変抵抗で変化させるだけであるから、種々の複雑な調光操作も簡単な抵抗回路の組合せにより行なうことができる。

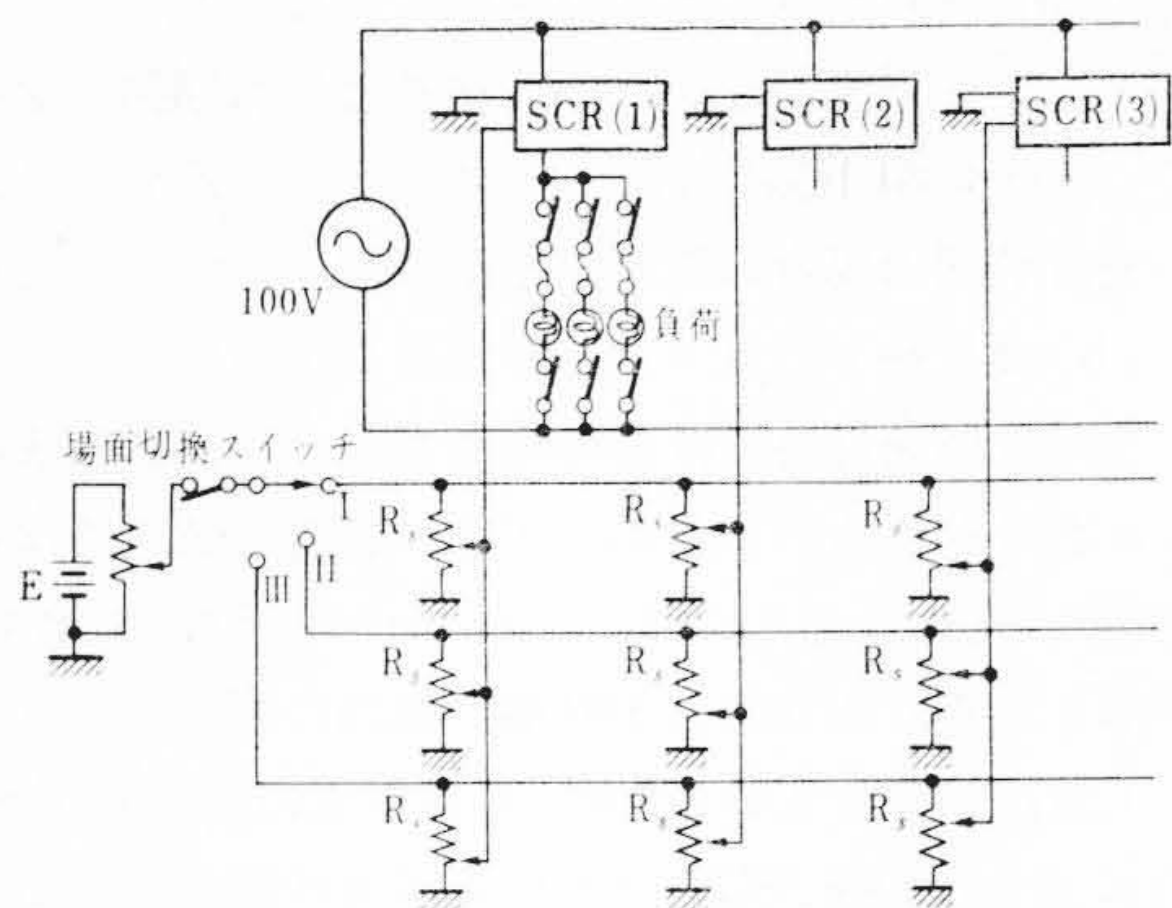
第13図はその一例で、あらかじめ設定された各場面の照明プログラムを調光ユニット個々にわたって事前にプリセットする回路である。この回路ではプリセット素子 R_s によりプリセットされ



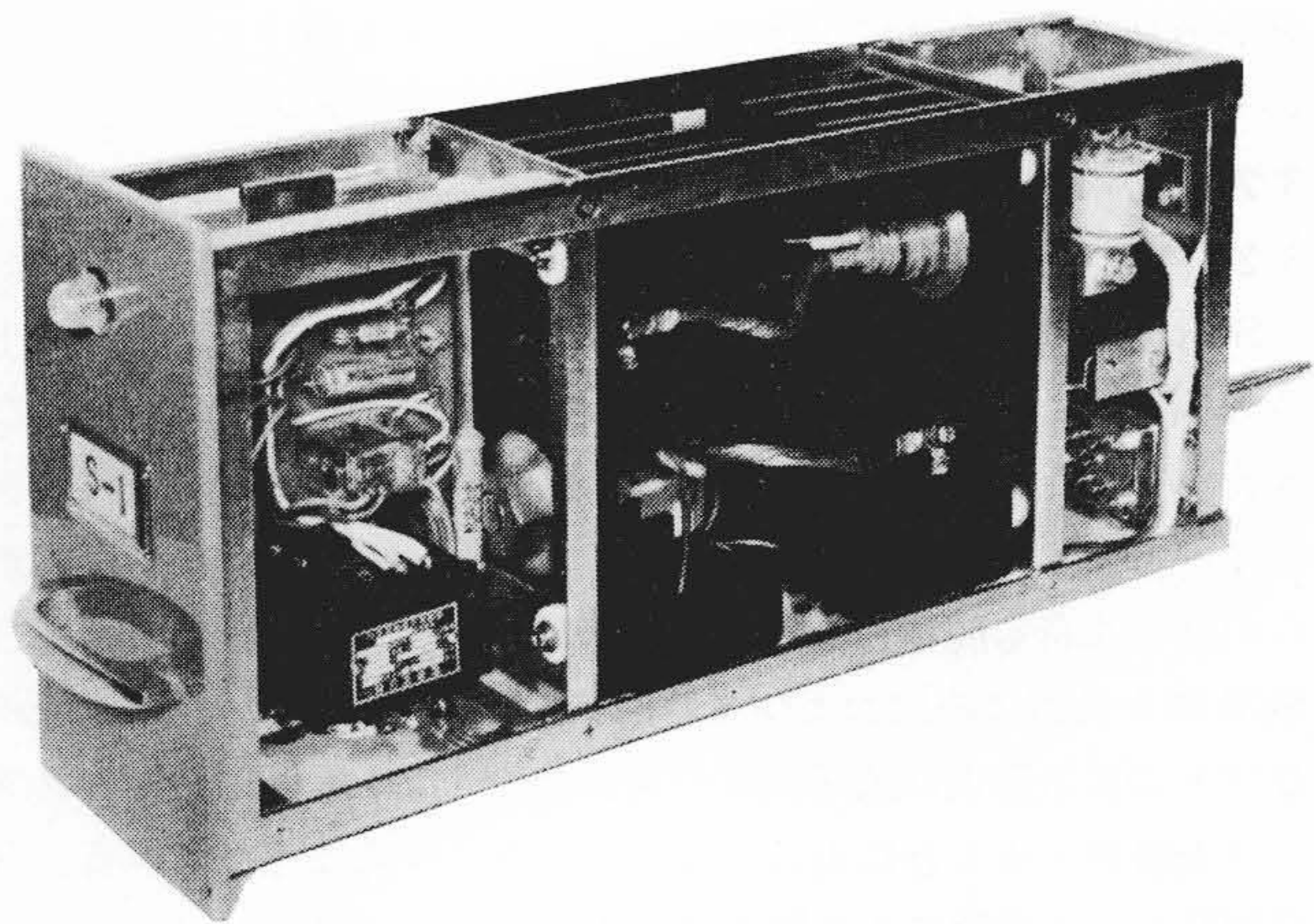
第11図 けい光灯調光回路



第12図 調光装置電源電圧



第13図 調光操作回路の一例



第14図 6kW SCR 調光ユニット

た各情景を場面の進行につれ場面切換スイッチで変えることができる。

そのほか各場面で同一変化をする調光ユニットを一括プリセットする回路、あるいはある情景から次の情景に徐々に移行させる回路なども構成でき、実際にはこのような操作回路を必要に応じて、いくつか組み合わせて使用されている。

第14図は6kW調光ユニットの外観である。

4. CdS 光導電セルを用いた自動点滅器

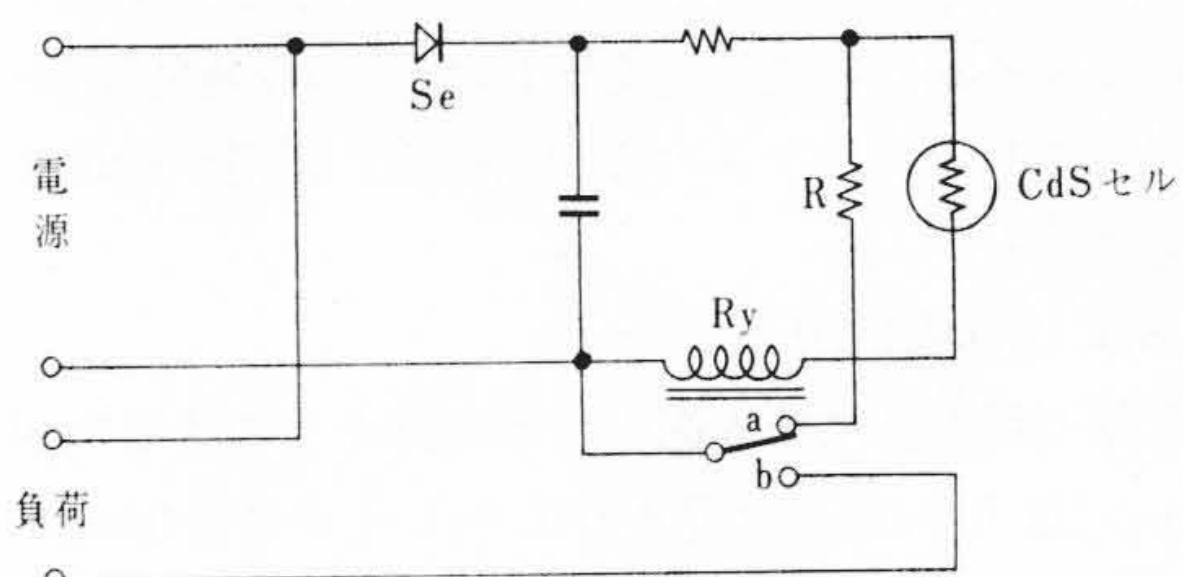
わが国で自動点滅器が発表されたのは1951年で、光電管式、セレン光電池式、液体移動式などを経て1959年からCdS光導電セルと継電器を組み合わせたものが実用化され、現在にいたっている。

CdS光導電セルでは高感度、大電流容量のものが比較的容易に得られ、増幅装置なしに直接継電器を動作させ得るので自動点滅器の構造は簡単である。継電器には電磁式またはバイメタル式および両者の併用が採用されている。

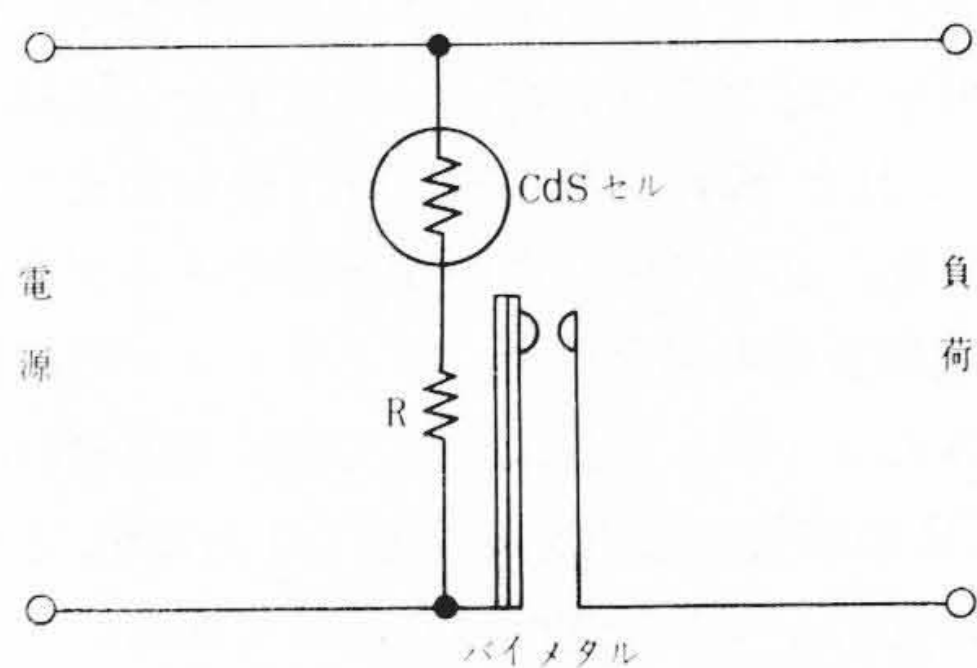
最近では自動点滅器は単に一般街路灯の点滅のみならず、トンネル照明、工場照明などの自動制御に至るまで広範囲に採用されつつある。

4.1 電磁継電器を使用した自動点滅器

第15図はその結線図を示す。交流100Vまたは200Vをセレン整流器Seで半波整流し、CdS光導電セルと継電器 R_y とを直列に接続したものであり、aは通電時閉路接点、bは通電時開路接点である。周囲照度が高くなるとCdS光導電セルの内部抵抗が減少するので電流が増加し、継電器が動作して負荷を切り消灯する。逆に周囲照度が下がると電流は減少し負荷回路が閉路されて点灯する。この方式では動作点はほぼ一定で、外気温度、電源電圧の影響を受ける



第15図 電磁継電器式自動点滅器の結線図



第16図 バイメタル式自動点滅器の結線図

ことも少ないが動作時間が短いので自動車のヘッドライトなど、瞬間的な光の変化による誤動作の心配がある。なお継電器動作後にはCdS光導電セルおよび継電器巻線と並列に抵抗 R を接続して消灯後のCdS光導電セルの電流を少なくするとともに、点灯照度と消灯照度間の照度差を少なくしてある⁽⁴⁾。

4.2 バイメタルを使用した自動点滅器

第16図のようにCdS光導電セルとバイメタルおよびバイメタル加熱用ヒータ R よりなり、CdS光導電セルとヒータは電源に直列に接続されている。周囲照度が高くなるとヒータ電流は増加し、ヒータ温度が上昇するため、バイメタルがわん曲して、負荷が消灯する。逆に周囲照度が下がるとヒータ電流が減少するため、バイメタルが復帰し負荷が点灯する。この方式では動作時間が長いので瞬間的な光の変化で誤動作することはないが、外気温度、電源電圧の影響を受けやすい欠点がある。

5. 結 言

以上述べたようにトランジスタけい光灯は回転変流機を用いたけい光灯点灯方式にかわって車両照明に、大容量SCR調光装置はオートトランス方式などにかわって劇場、テレビスタジオなどの舞台照明に使用されている。またCdS光導電セル利用の自動点滅器は街路灯の点滅に実用されている。

これら半導体製品の応用により照明回路の小形、軽量、高効率化が進められている。今後、トランジスタけい光灯は電池内蔵式携帯用けい光灯、非常灯としての利用も期待されるとともに、SCRによるけい光灯の多数点灯用高周波電源装置の開発も進められている。SCR調光装置では小容量のものについて壁埋込スイッチボックスに収納可能なほど小形化されたものも開発されつつある。

参 考 文 献

- (1) 雨宮：「電源回路」日刊工業新聞社（昭37）
- (2) H. C. Linほか：IRE Transaction On Electron Device 174 (July, 1960)
- (3) 瀬川：OHM 125（昭38-11）
- (4) 上村：照明学会雑誌 18（昭38-11）