

[第3章]

AC100V 数百Wのヒータ/電球を制御しよう

サーミスタ&電力を扱うための
回路とプログラミング

荻山 正生

ここではPICを使用した、トライアックによる大電流制御回路を解説します。動かすものはヒータや調光用の電球です。制御方法としては簡単なON/OFF制御と、少し高度な位相制御です。

今までハード・ロジックで組まれてきた分野ですが、PICを利用することにより、高度な制御が簡単にできます。使用するPICはアナログ入力(4もしくは5チャンネルの10ビットA-Dコンバータ)が付いている12F675, 16F819です。

3-1 設計に際して

PICのアナログ入力にはサーミスタと温度設定ボリュームを接続し、デジタル出力にはフォト・トライアック経由でトライアックを接続します。図3-1に全体の構成図を示します。

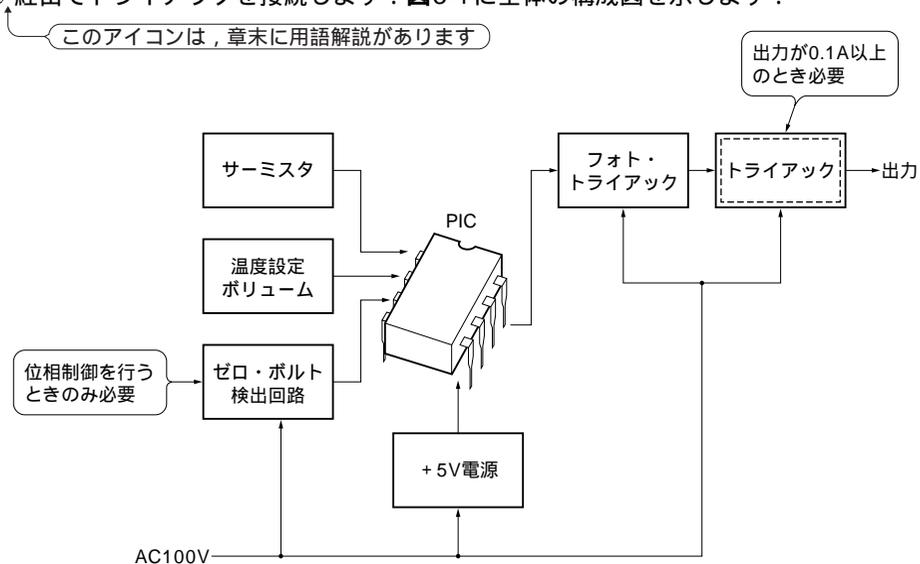


図3-1 構成図

必要最小限の構成。サーミスタで温度を測り、温度設定ボリュームで設定された温度と比較し温度が低ければ出力をON, 高ければOFFにする。ON/OFF制御のみ行う場合のゼロ・ボルト検出回路は不要。

基本は単純で、電気の世界ではオームの法則が理解できれば、だいたいのことは解決できます。

- 🔥 電気は+ から - に流れ、途中の障害物を抵抗と言います。
- 🔥 電線にも空気にも水にも抵抗がありますが、その大きさが違うだけです。
- 🔥 当然ながら電線にも抵抗があるため電気が流れると発熱します。
- 🔥 ヘアードライヤなど大電流の電気製品を10分ほど使用した後、電線にさわると暖かかったという経験のある読者も多いでしょう。もし、電線が細かったら(抵抗が大きい)どうなると思いますか？ヘアードライヤで発熱すべきエネルギーが電線でも消費され、電線が溶けて燃えてしまいます。そうです、大電流を扱う場合の注意点は電線を太くし、熱で部品が壊れないようにすることです。

- 電線には安全電流という流すことのできる電流値が決まっています。
- 安全電流値を無視した設計を行うと火事になります。
- 部品も同じように許容温度という決まりがあります。
- この部品は何度まで耐えるかを考えて設計することが大切です。
- 部品単品で発熱量を計算し、温度が上がるようなら放熱器やケースを利用して冷却します。

どうか読者のみなさん、部品のカタログや仕様書を見て安全な設計を行ってください。

3-2 温度センサ

● サーミスタを使う

温度を測る部品は多くの種類がありますが、部品の入手、丈夫さ、取り扱い、価格を考えるとサーミスタが最適です。ただ、サーミスタの欠点は温度と抵抗値が比例しない点です(非直線性)。そこで、サーミスタの特性表から温度に対する抵抗値を表にしてプログラムで換算し利用します。

サーミスタ以外の部品では専用の温度センサICや熱電対などがありますが、PICで使用するには高価で、増幅回路、補償回路、電源が必要で複雑になり本章では紹介しません。部品が多いと故障する確率が高くなり、何しろ配線が大変で、価格も高くなります。

サーミスタの温度-電圧変換回路は単純で図3-2に示します。使用するサーミスタは石塚電子製の502A-T-2です。各温度の抵抗値はメーカーのカタログや技術データ(表3-1)から引用します。表計算ソフトExcelを使用しA-D変換した値、分解能を計算し、表3-2のような温度-電圧変換表を作ります。

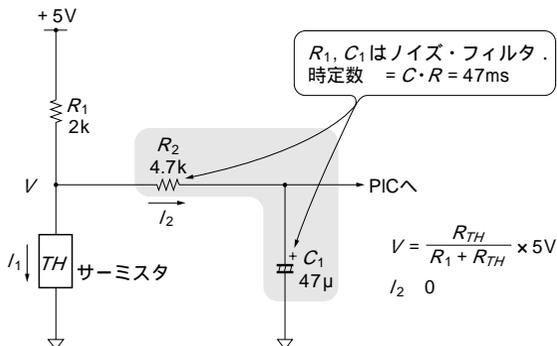


図3-2 温度-電圧変換回路

もっとも簡単なサーミスタの温度を電圧に変換する回路。 R_1 とサーミスタ R_{TH} の分圧回路でサーミスタの電圧をPICで測定する。PICに流れ込む電流は僅かなので無視できる。 R_2 と C_1 はノイズ・フィルタ。

● 温度-電圧変換表の作り方

データ・シートやメーカーのホームページに記載されている技術データをダウンロードし、各温度に対するサーミスタの抵抗値 (R_{st} : 標準抵抗値) を必要な温度範囲だけコピーします。

R 欄 (表3-2の R_1) に数字を入力すると各温度に対する数値が変化します。 R_1 の選定方法はサーミスタに流れる電流と分解能 (CNT/) で決めます。

サーミスタに電流を流すと当然ながらサーミスタ自体が発熱します。この発熱が大きいと周囲の温度を測っているのかサーミスタ自体の発熱温度を測っているのか、わからなくなってしまいます。したがって、サーミスタに流す電流は小さければ誤差が少なく測定できますが、小さすぎても分解能 (CNT/) やノイズなどの点から誤差が大きくなってしまいます。

表3-1⁽³⁾ サーミスタの特性表

メーカーから公表されている特性表(石塚電子のホームページより)。

各温度に対する抵抗値がExcelで表になっている。ここでは途中を省略しているが、110 までのデータが掲載されている。

502AT-2 抵抗-温度特性

抵抗値 5k (25)

抵抗値誤差 ±1%

B定数 3324k(25/85)

B定数誤差 ±1%

| 温度 () | 抵抗値(最大) (k) | 抵抗値(標準) (k) | 抵抗値(最低) (k) | 誤差 () | |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------|------|
| -40 | 92.42 | 88.91 | 85.52 | -0.8 | +0.8 |
| -39 | 87.51 | 84.24 | 81.07 | -0.8 | +0.8 |
| -38 | 82.91 | 79.85 | 76.88 | -0.8 | +0.8 |
| -37 | 78.58 | 75.72 | 72.95 | -0.8 | +0.8 |
| -36 | 74.52 | 71.84 | 69.25 | -0.7 | +0.8 |
| -35 | 70.69 | 68.19 | 65.76 | -0.7 | +0.7 |
| -34 | 67.09 | 64.75 | 62.48 | -0.7 | +0.7 |
| -33 | 63.71 | 61.51 | 59.38 | -0.7 | +0.7 |
| -32 | 60.51 | 58.46 | 56.46 | -0.7 | +0.7 |
| -31 | 57.51 | 55.58 | 53.71 | -0.7 | +0.7 |
| -30 | 54.67 | 52.87 | 51.12 | -0.7 | +0.7 |
| -29 | 51.95 | 50.26 | 48.62 | -0.7 | +0.7 |
| -28 | 49.38 | 47.80 | 46.26 | -0.7 | +0.7 |
| -27 | 46.96 | 45.48 | 44.03 | -0.7 | +0.7 |
| -26 | 44.67 | 43.28 | 41.93 | -0.7 | +0.7 |
| -25 | 42.51 | 41.21 | 39.94 | -0.7 | +0.7 |
| -24 | 40.47 | 39.26 | 38.07 | -0.7 | +0.7 |
| -23 | 38.55 | 37.41 | 36.29 | -0.7 | +0.7 |
| -22 | 36.73 | 35.66 | 34.61 | -0.7 | +0.7 |
| -21 | 35.01 | 34.01 | 33.02 | -0.7 | +0.7 |
| -20 | 33.39 | 32.44 | 31.52 | -0.6 | +0.7 |
| -19 | 31.82 | 30.93 | 30.07 | -0.6 | +0.6 |
| -18 | 30.34 | 29.51 | 28.69 | -0.6 | +0.6 |
| -17 | 28.93 | 28.16 | 27.39 | -0.6 | +0.6 |
| -16 | 27.61 | 26.88 | 26.16 | -0.6 | +0.6 |
| -15 | 26.35 | 25.66 | 24.99 | -0.6 | +0.6 |
| -14 | 25.16 | 24.52 | 23.88 | -0.6 | +0.6 |
| -13 | | 23.43 | 22.83 | -0.6 | +0.6 |
| | 0.5053 | 0.4990 | 21.83 | -0.6 | +0.6 |
| 104 | 0.4932 | 0.4869 | 20.89 | -0.6 | +0.6 |
| 105 | 0.4814 | 0.4654 | 19.99 | -0.6 | +0.6 |
| 106 | 0.4700 | 0.4543 | 19.12 | -0.6 | +0.6 |
| 107 | 0.4589 | 0.4435 | 18.28 | -0.6 | +0.6 |
| 108 | 0.4481 | 0.4330 | 0.4182 | -0.6 | +1.5 |
| 109 | 0.4376 | 0.4227 | 0.4083 | -1.5 | +1.5 |
| 110 | 0.4275 | 0.4128 | 0.3986 | -1.5 | +1.5 |

表3-2 温度-電圧変換表

R₁を入力し、各温度に対するサーミスタの電圧、A-D変換したときの結果、1 当たりの変化量をExcelで表計算する。

Th = 502AT-2 R₁ = 石塚電子

| | R | V | CNT | HEX | CNT/ |
|-----|---------|--------|-------------|-------------|------|
| 温度 | 抵抗値 | 電圧 | A-D変換値(10進) | A-D変換値(16進) | 分解能 |
| 0 | 13.2900 | 4.3460 | 890.06 | 037A | 5.00 |
| 1 | 12.7400 | 4.3216 | 885.06 | 0375 | 5.08 |
| 2 | 12.2200 | 4.2968 | 879.98 | 036F | 5.14 |
| 3 | 11.7300 | 4.2717 | 874.84 | 036A | 5.40 |
| 4 | 11.2500 | 4.2453 | 869.43 | 0365 | 5.43 |
| 5 | 10.8000 | 4.2188 | 864.00 | 0360 | 5.56 |
| 6 | 10.3700 | 4.1916 | 858.44 | 035A | 5.68 |
| 7 | 9.9600 | 4.1639 | 852.76 | 0354 | 5.79 |
| 8 | 9.5690 | 4.1356 | 846.98 | 034E | 5.90 |
| 9 | 9.1960 | 4.1068 | 841.08 | 0349 | 6.01 |
| 10 | 8.8400 | 4.0775 | 835.07 | 0343 | 6.19 |
| 11 | 8.4960 | 4.0473 | 828.88 | 033C | 6.31 |
| 12 | 8.1670 | 4.0164 | 822.56 | 0336 | 6.42 |
| 13 | 7.8530 | 3.9851 | 816.14 | 0330 | 6.53 |
| 14 | 7.5530 | 3.9532 | 809.62 | 0329 | 6.62 |
| 15 | 7.2670 | 3.9209 | 803.00 | 0323 | 6.73 |
| 16 | 6.9930 | 3.8880 | 796.27 | 031C | 6.83 |
| 17 | 6.7300 | 3.8547 | 789.43 | 0315 | 6.91 |
| 101 | 0.5135 | 1.0215 | 782.52 | 030E | 7.00 |
| 102 | 0.5010 | 1.0016 | 775.50 | 0307 | 7.10 |
| 103 | 0.4888 | 0.9820 | 201.11 | 0009 | 3.86 |
| 104 | 0.4769 | 0.9627 | 197.16 | 00C5 | 3.76 |
| 105 | 0.4654 | 0.9439 | 193.30 | 00C1 | 3.69 |
| 106 | 0.4543 | 0.9255 | 189.55 | 00BD | 3.62 |
| 107 | 0.4435 | 0.9075 | 185.86 | 00B9 | 3.58 |
| 108 | 0.4330 | 0.8898 | 182.24 | 00B6 | 3.47 |
| 109 | 0.4227 | 0.8724 | 178.66 | 00B2 | |
| 110 | 0.4128 | 0.8554 | 175.19 | 00AF | |

113行目の計算式

| | |
|------------------------|------------------------------|
| C列 = 5V*B列/(B列 + D1) | "= 5*B113/(B113 + \$D\$1)" |
| D列 = C列/(5V/1024) | "= C113/(5/1024)" |
| E列 = DEC2HEX(D列 , 4) | "= DEC2HEX(D113 , 4)" |
| F列 = D列 - (D列 + 1) | "= D113 - D114 " |

分解能は温度が1℃変化したときのA-D出力が変化する割合で、この値が大きいほうが正確に測定できます。R₁を10kΩとした場合、0℃の分解能は9.6カウントですが100℃では1.1カウントまで下がります。通常A-D変換器の誤差は1カウントあり、100℃のときに99と表示したり101と変換してしまいフラフラして安定しません。

別の表現をすれば100℃のときの電圧は0.25008V、101℃のときの電圧は0.24456Vで、その差は5.52mVしかありません。PICの内蔵A-D変換器の分解能は4.88mV(5/1024)で、4.88mV以下の変化は検出できないことを示唆しています。計算上は5.52 > 4.88で良いのですが、ちょっとしたノイズで測定値は99になったり101になったりしてしまいます。

また、サーミスタ自身にも抵抗器にも誤差があります。容易に入手可能な抵抗器は誤差が5%と1%のもので、変換表のR₁欄に誤差を加味した値を入力し検証してみると、あまりシビアに計算し考える必要のないことが判断できるでしょう。

といっても具体的にR₁を決めなければなりません。オームの法則から測定温度の中心値の抵抗値と同じ値のR₁を選定すれば、分解能が大きくなり低温でも高温でも分解能が小さくならず測定できることが計算できます。

3-3 温度の設定法

温度を設定するにはデジタル方式とアナログ方式があります。デジタル方式の場合、LEDやLCD表示器が必要で、表示するためのプログラムも作らなくてはならず、表示器も高価です。本章では図3-3のようなボリュームを使用したアナログ方式で行います。

アナログなボリュームを使用したからといっても動作はデジタルです。電源とアースの間にボリュームを挿入してPICに0V～5Vのアナログ電圧を入力します。その後、A-D変換することにより、ボリュームの回転角に対応したデジタル値にします。

PICプログラムでは回転角(目盛)の相関表を作っておき、先のデジタル値と比較することで回転角が認識できます。ボリュームは、回転角と抵抗値が直線的に変化するB特性のものを使用します。

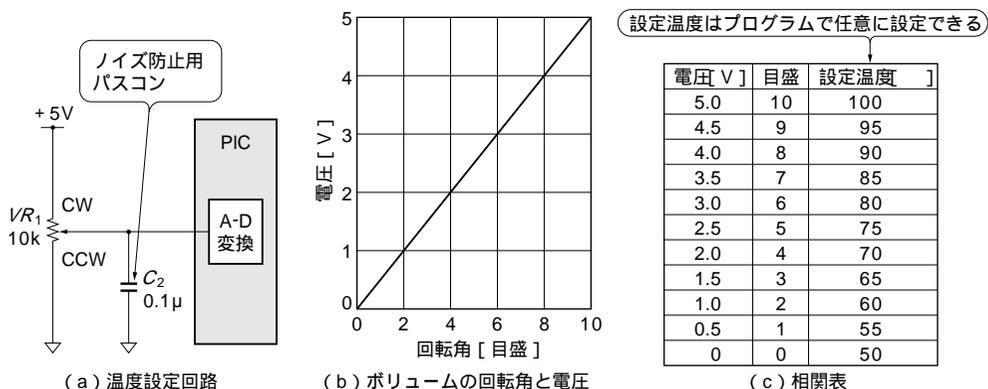


図3-3 温度設定回路と相関表

ボリューム1個で0Vから5Vのアナログ電圧をA-D変換し、ボリュームの回転角をデジタルに変換する回路。ボリュームの抵抗値は10kΩ程度。C₂はノイズ防止のパスコン。ボリューム目盛と設定温度はプログラムで任意に設定できる。

3-4 出力のON/OFF制御

出力であるAC100VをONしたりOFFすることをON/OFF制御と言います。ヒータを例にすると、設定温度よりヒータの温度が低い場合はヒータをONし、高い場合はOFFするという制御のことで、ちょっと古い電気こたつ、電気ポットは機械的なバイメタルのサーモスタットを使用し、ホット・カーペットなどはリレーでON/OFFしています。

電気が入るときに「カチッ」と音がするのを聞いた読者も多いと思います。電気ヒータのスイッチを人間がONしたりOFFするのも手動のON/OFF制御といえます。

ON/OFF制御の特徴は単純で部品が少なく安くできることです。バイメタルのサーモスタットは部品一つで温度制御ができます。しかし当然ながら高度な制御は困難です。

さらに、大電力用のヒータや電球の電圧と電流、温度、抵抗の特性を考えると、リレーによるON/OFF制御はあまり良い手法ではありません。それは、発熱体の温度が低い場合、抵抗値が極端に低いことがあるからです。

● 温度が低いときに大電流が流れる

試しに白熱電球の抵抗値をテスタで測定してみてください。メーカーや種類にもよりますが100V 100Wの電球は20 の場合約8 です。オームの法則から100V 100Wなら100 のはずですが、電球は温度によって図3-4のように抵抗値が極端に変化するのです。

それに、家庭用の100Vは交流でテスタで測れば100Vですが、オシロスコープなどで実際の波形を見て測ると最大電圧が141Vと読み取れます。



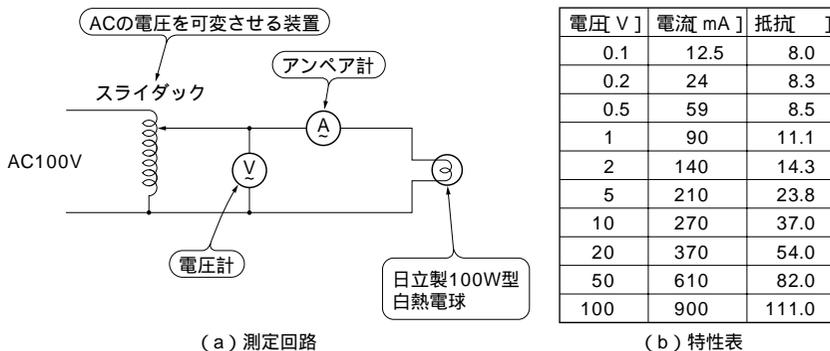


図3-4 白熱電球の電圧-電流-抵抗特性
電圧によって抵抗値がダイナミックに変化する様子が理解できる。

電圧が141Vの瞬間に白熱電球をONしたら何アンペアの電流が流れるでしょうか？

オームの法則 $I = E/R$ より $I = 141/8 = 17.6A$

となり100Wを信じて計算すると100 だから1Aであると思っていると、実は瞬間に約17倍もの電流が流れることになります。この電流を突入電流と言います。

しかし、電流が流れフィラメントの温度が上昇すると抵抗値も増えて、電流は低下します。最終的には抵抗値が100 になり電流は1Aに落ち着きます。

17倍もの突入電流が流れてしまう対策は原因を分析すれば、見えてきます。

- (1) 電球の抵抗が低いときにONするから大電流が流れてしまう。
- (2) 電圧が141VのときにONするから大電流が流れてしまう。

(1)の対策としては、電球が消えている間もわずかな電流を流しておきフィラメントの温度を上げて抵抗値を大きくしておけば、141Vの電圧を加えても大電流が流れなくなります。ただし、OFFの間も電流が流れているので無駄な電気代が必要になります。

(2)の対策としては、電圧が低い瞬間にONすれば瞬時に大電流が流れなくなります。その後電圧上昇と共にフィラメントの温度が上昇し抵抗も増えるので大電流が流れなくなります。

● 0V付近でON/OFFさせる

実際の方法としては交流電圧をPICで監視し0V付近で出力をONするか、自動的に0V付近でONする部品を使用します。PICで電圧を監視する方法は次項の位相制御で説明するとして、ここでは0VでONする部品を使います。

具体的には、ゼロ・クロス用のフォト・トライアックとトライアックを使用します。部品の入手性からフォト・トライアックは東芝製のTLP561を、トライアックは出力電流にもよりますが最大電流が16Aの東芝製SM16GZ47を使用します。

トライアックの簡単な動作を図3-5に、出力回路を図3-6に示します。 R_4, R_5 はトライアックのゲート電流を決める抵抗で、100 から470 でよいでしょう。 Z_1 はノイズ防止用のCR複合部品で、抵抗とコンデンサを直列にしても代用できます。抵抗負荷の場合は理論的に不要ですが挿入しておいたほうがよいでしょう。

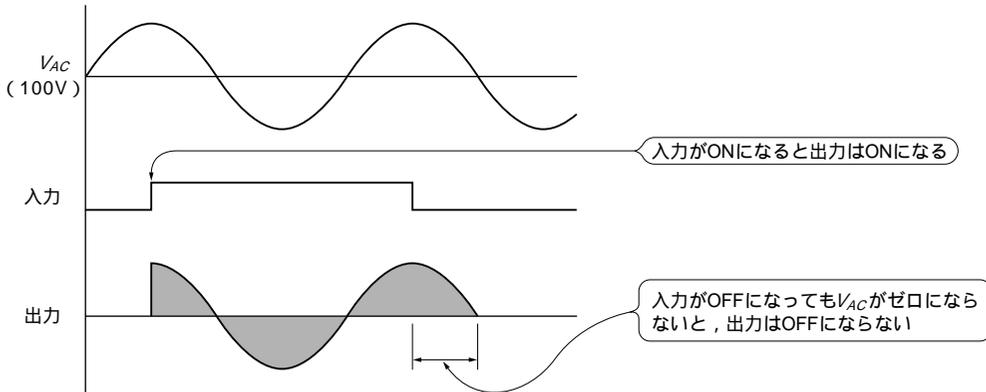
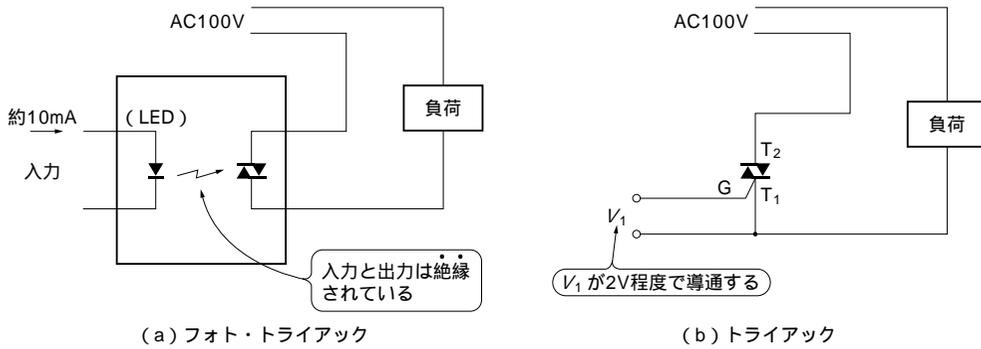


図3-5 フォト・トライアック，トライアックの簡単な動作

フォト・トライアックのフォトとはLEDのことで，LEDが光ることによりトライアックが導通する．光によるスイッチ動作のため入力と出力は絶縁されている．一般のフォト・トライアックは最大0.1A程度の電流を制御できるが，それ以上の電流を制御する場合はトライアックを接続する（ある種の増幅）．

3-5 可変出力制御

前項のON/OFF制御はONかOFFのどちらかしか選択できません．電力で表現すれば0%か100%のどちらかです．ONとOFFの間，すなわち10%，20%や90%など中途半端な電力を扱えません．特例として図3-7のように出力に整流用ダイオードを挿入すれば電圧は50%に，電力は25%になりますが苦肉の策といえます．

ヒータの場合は問題ないのですが，電球の場合は電圧がゼロのところ電球が消えてしまい，ちらつきが発生してしまいます．

別の方法として，次の二つがあります．

(1) 交流のサイクル波形を間引く

前項の発展型で図3-8のようになります．整流用ダイオードと同じように電球ではちらつきが発生して使えません．

(2) 交流電圧のONする時間を可変にする

図3-9のように波形の途中から，0VまでONします．広く一般的に使われている制御方法で，位相制御といえます．