

# 人工衛星用高能率安定化電源

野 村 民 也 ・ 林 友 直  
長 江 幸 昭 ・ 福 滝 隆

## High efficiency voltage regulator for satellites

By

Tamiya NOMURA, Tomonao HAYASHI, Sachiaki NAGAE, Takashi FUKUTAKI

**Abstract:** The performance of a high efficiency switching mode voltage regulator for satellite use is investigated. A blocking oscillator with a mesa type Si power transistor. is used as the switching unit. The off-time in the switching sequence is controlled by the error signal, which is obtained by comparing the output voltage to a reference voltage. Since the on-time is kept constant the duty ratio of the switching wave form varies and the filtered output of the switched voltage is regulated to a fixed value (+12 V). The repetition frequency of the switching oscillator changes between 5 kc/s and 10 kc/s corresponding to the input voltage variation between 15 V and 25 V. The overall efficiency of this circuit is about 90%, and the contributions of each components or units to the power loss are estimated as follows:

- |   |      |
|---|------|
| a) Loss in the switching element:           | 3 %  |
| b) Loss in the smoothing filter:            | 1.2% |
| c) Loss in the error detecting circuit:     | 2.0% |
| d) Loss in the off-time control transistor: | 3.8% |

Several modifications of high efficiency Switching mode voltage regulator are also suggested.

### 概 要

人工衛星用高能率スイッチング型電圧安定化回路について述べてある。スイッチング回路としては、メサ型 Si トランジスタを用いたブロッキング発振器を用いている。この場合出力電圧を基準電圧と比較することによって得られた誤差信号で off-時間を制御する。そのさい on-時間は一定に保たれているから、開閉の負荷率が変化することとなり、その滑化出力は一定値 (+12 V) に維持されるのである。入力電圧が 15 V から 25 V 変化す平るとき、開閉の繰り返し周波数は 5 K% から 10 K% の間に変化する。総合的効率は約 90% であるが、その損失の成分をわけてかくと次の通りである。

- |                          |      |
|--------------------------|------|
| a) スイッチング素子における損失:       | 3%   |
| b) 平滑フィルタにおける損失:         | 1.2% |
| c) 誤差検出回路における損失:         | 2.0% |
| d) off 時間制御トランジスタにおける損失: | 3.8% |

なお、この種安定化回路のいくつかの変形についても触れている。

## 1. 緒 言

人工衛星用の電源としては、太陽電池によって、二次電池を充電する方式が広く用いられているが、そのさい衛星が太陽に照らされる場合と地球の影に入った場合とでは、一般に二次電池の端子電圧にかなりの変動を生ずる。したがって、一定の供給電圧を必要とする回路に対しては電圧安定化回路によって安定化した出力を用いなければならない。

その際に限られた供給エネルギーを負荷で最大限に利用するためには、電力効率を極力高めておく必要がある。

このための安定化回路としては、スイッチング方式が適当であって、その具体的回路も種々のものが考えられるが、ここでは回路が比較的簡単であることから Telstar に用いられているブロッキング発振器型スイッチングモード安定化回路方式を中心にして実験的に検討した。

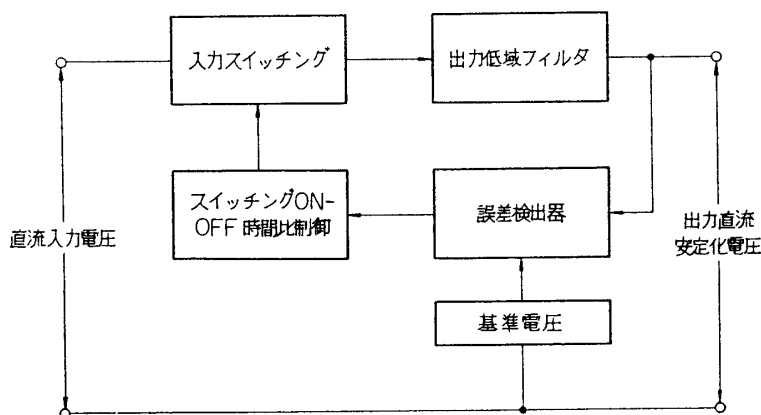
Telstar における実例については、従来その原理と回路の概要が知られているのみで、回路構成については不明の点が多い。この意味で本研究の結果が、この種回路の設計、製作にあたって一助となれば幸いである。

## 2. スイッチングによる安定化電源

人工衛星の安定電源としては宇宙空間という特殊環境の中で長時間にわたって安定性、信頼性、耐放射線性がすぐれていることも必要であるが、変換効率のすぐれていることも不可欠であり、また広範囲な入力変動および負荷変動に対して出力電圧変動の少ないことが要求される。

現在安定化電源装置としては、一般に真空管またはトランジスタの直線動作領域を利用した直列制御方式あるいは並列制御方式が用いられている。これらの方式では安定度、電圧変動などに関しては、比較的すぐれた性能を期待することができるが、本質的に変換効率が悪くまた比較的大型になるので人工衛星の電源用には不適當である。

これに対して第 1 図に示すように、直列スイッチング素子の ON, OFF 時間比を制御する方式をとれば、電圧安定化のために必要な損失を非常に少なくできるので、かなり高い電



第 1 図 スイッチング安定化電源構成図

力変換効率が期待される。

すなわち、出力直流電圧の一部と基準直流電圧とを比較し、出力電圧が高ければ入力スイッチの負荷率を下げ、また出力電圧が低くなれば負荷率を上げることによって電圧の安定化を図るのである。その際負荷率を制御する方式としてはいろいろ考えられる。たとえばスイッチの開閉周波数は一定のままで負荷率のみを制御してもよいし、あるいは ON, OFF の時間の一方を一定にしておいて他方を制御してもよいが、ここでは後者の方式を用いた。

### 3. 回路の性能および実験結果

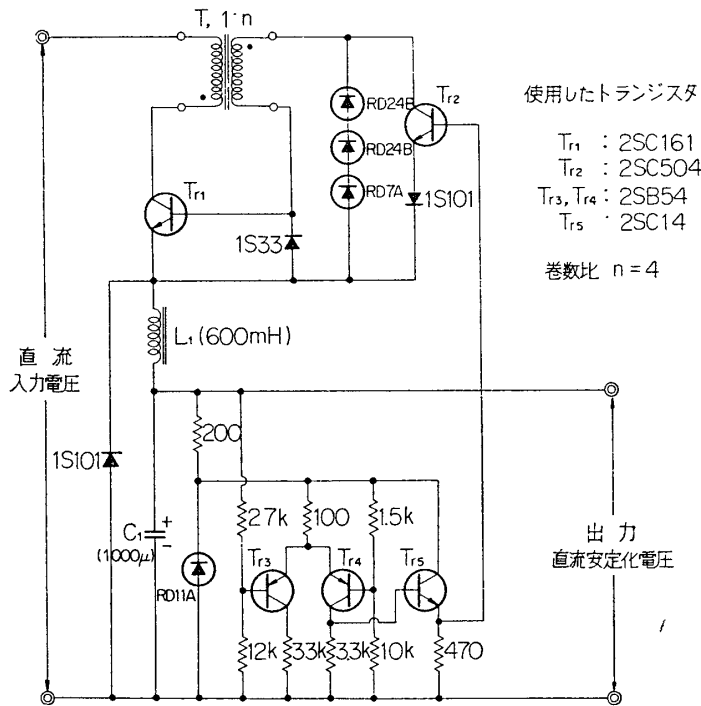
入力開閉素子としてはトランジスタ、SCR 等が考えられるが、ここでは第 2 図に示すようにトランジスタを使用し、これを含む一種のブロッキング発振回路を構成することによってスイッチングを行なっている。

なお、負荷率の制御には発振回路の一部に直列接続したトランジスタの等価的コレクター、エミッタ間抵抗を変化することによってスイッチの OFF 時間を変化させた。

第 2 図における各素子の機能の概略を述べると次の通りである。

トランジスタ  $T_{r1}$ : 直流入力電圧の ON, OFF を行なう。すなわちブロッキング発振二次回路で決る周期で直流入力電圧を開閉し、入力をパルスの形で負荷側に送り出す。この回路ではトランジスタ  $T_{r1}$  の ON 時間は常に一定になるように設計した。

トランジスタ  $T_{r2}$ : スwitching の OFF 時間制御用トランジスタでブロッキング発振二次回路の一部として動作し、このトランジスタのベース入力の加減によってスイッチングの OFF 時間を制御する。



第 2 図 ブロッキング発振器型スイッチングモード安定化電源回路

たとえば  $T_{r2}$  のベース電流が増せば等価的なコレクター、エミッタ間抵抗は小さくなり、そのために発振二次回路の時定数が大きくなるのでトランジスタ  $T_{r1}$  の OFF 時間が長くなる。

トランジスタ  $T_{r3}$ ,  $T_{r4}$ : 出力直流電圧と基準直流電圧の誤差検出回路として働き、この検出回路出力を  $T_{r2}$  のベースへ帰還して OFF 時間を制御する。

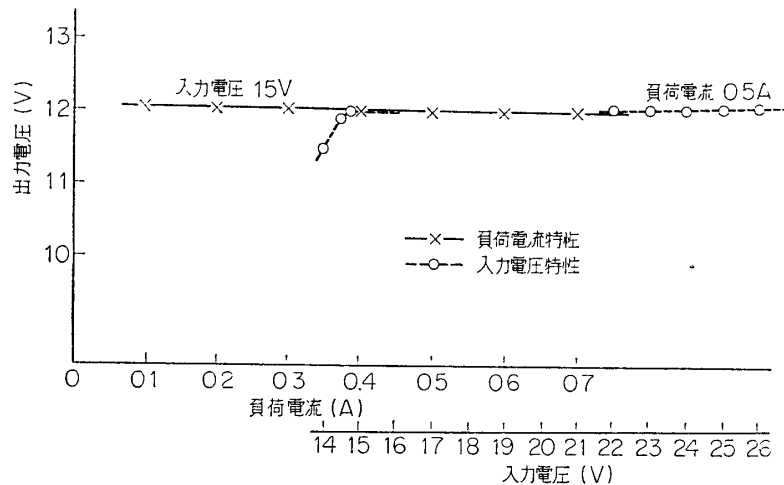
たとえば出力端電圧が高まれば誤差出力が増してトランジスタ  $T_{r2}$  のベース入力が大きくなるので、スイッチングの OFF 時間が延びる。

したがって、出力端電圧は定格値に対する上昇分だけ下ることになる。出力端電圧が低くなった場合も同様にして補正される。

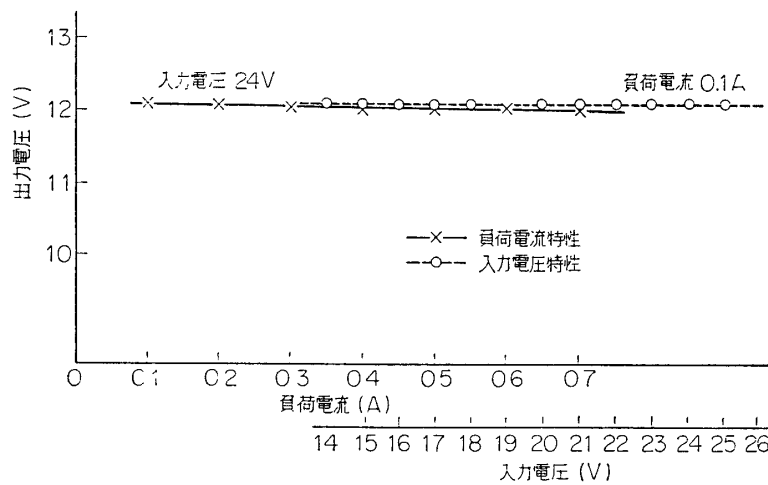
トランジスタ  $T_{r5}$ : 誤差検出回路と OFF 時間制御トランジスタ間の整合回路である。

チョークコイル  $L_1$ , コンデンサ  $C_1$ : 波形平滑用の低域フィルターである。トランジスタ  $T_{r1}$  によって断続された入力電圧を平滑して負荷側へ供給する。

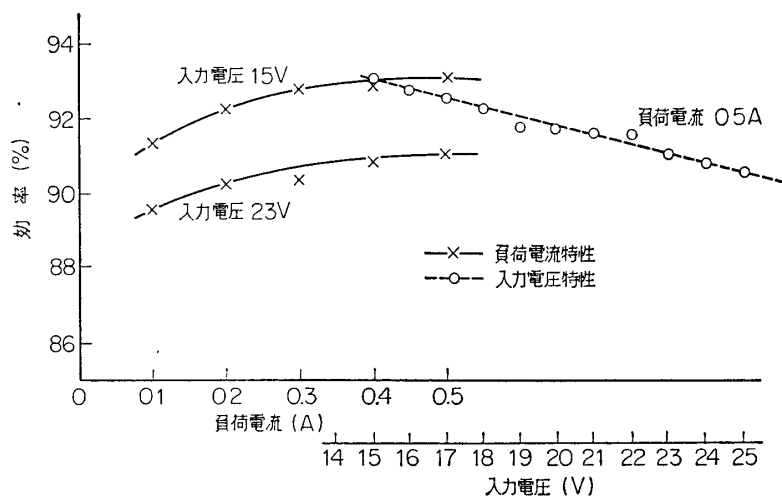
変圧器  $T$ : ブロッキング発振用の電流トランス。



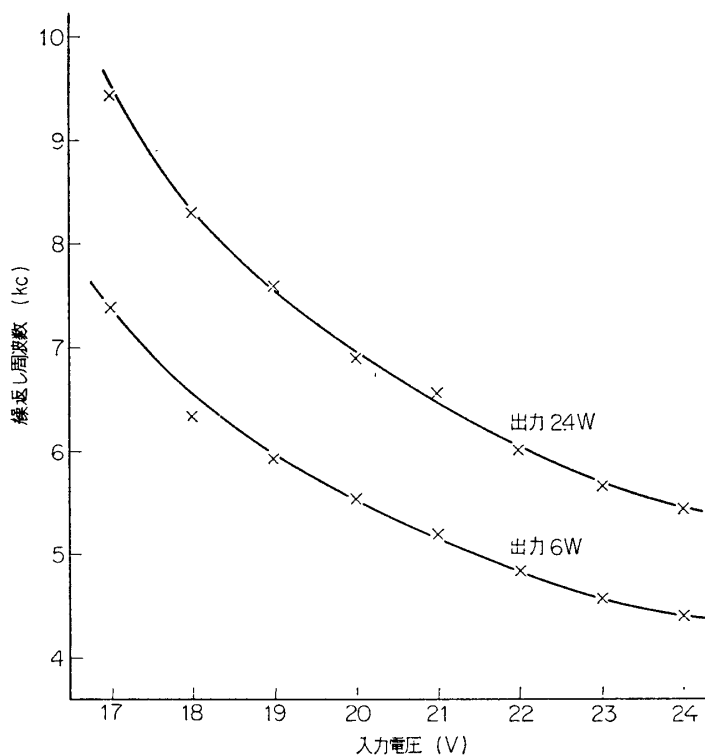
第 3 図 入出力特性-1



第 4 図 入出力特性-2



第5図 負荷電流-入力電圧-効率



第6図 入力電圧-繰返し周波数

第2図の回路において得られた諸特性を第3図, 第4図, 第5図, 第6図に示す。おもな性能諸元をまとめると次の通りである。

1. 入力電圧変動: 15~25V
2. 最大負荷電流: 0.5A (6W)
3. 出力安定化電圧: 12V
4. 電力変換効率\*: 90%~92%
5. 電圧変動率: 1/4~全負荷および入力
6. リップル: 0.2% 以下の全変動に対して±0.2%以下

## 7. 繰り返し周波数 5~10 kc (負荷率 45~85% に対応)

\* 電力変換効率、入力電流と電圧の積に対する出力電流と電圧の積の比であるが、入力電流は波形が歪んでいるために入力電力を求めるには波形の数値積分を必要とする。

## 4. 考 察

## 1) フィルター設計

上記の回路における出力低域フィルターは断続された入力電圧を平滑するのが目的である。リップル含有率のみを考慮するならば、チョークコイル  $L_1$ 、コンデンサ  $C_1$  の大きな素子を使用すればよいが、その容積、重量等もできる限り小さくしなければならない。またコイル  $L_1$  を大きくすると巻線の抵抗分が大きくなり、この抵抗分による効率の低下を招く。

したがって出力フィルター  $L_1$ 、 $C_1$  の最適値はリップル含有率、巻線の抵抗分による損失、容積、重量等を考察して決定する必要がある。

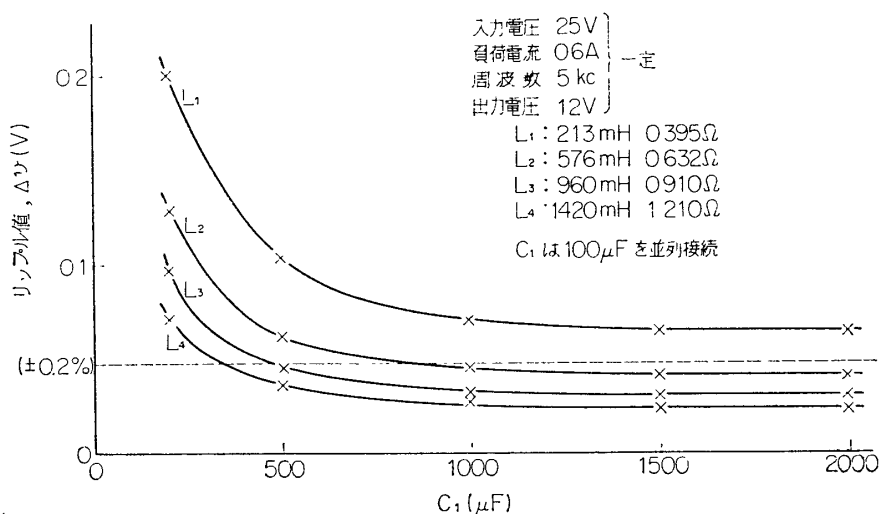
入力電圧が断続された波形は、負荷電流と入力電圧による繰り返し周波数の変化、負荷率の変化および入力レベルの変化の影響を同時に受ける。したがって計算によってチョークコイル  $L_1$  とコンデンサ  $C_1$  の値を決定するのはきわめて困難なので、本研究においては  $L_1$ 、 $C_1$  を実験的に決定した。

平滑後の出力リップルが最大になるのは繰り返し周波数が最低で入力電圧最大、負荷電流最大の場合であるからこの条件で  $L_1$ 、 $C_1$  を決めておけば安全である。

第7図に  $L_1$  をパラメータにした  $C_1$  に対するリップル値  $\Delta v$  (V) の実験結果を示す。

この実験ではリップルが最大になる条件すなわち繰り返し周波数 5 kc、入力電圧 25 V、負荷電流 0.6 A としこれらの値を一定にして  $\Delta v$  を測定した。

またチョークコイルには高周波損失と経年変化の少ないようなトロイダルのフェライトコア (TDK H<sub>5A</sub> 材) を使用したトロイダル形を用いたのは機械的安定性を期待したためである。コンデンサ  $C_1$  としてはタンタル電解コンデンサを用いた。



第 7 図 出力リップル (p-p) 値

## 2) 変換効率の検討

第2図の回路では現在のところ約 90% の変換効率を得られている。すなわち入力約 10% は損失になっているわけであるがその内訳を調べたところ次のような結果が得られた、

- (a) スイッチング素子における損失 3%
- (b) 平滑用フィルターの抵抗損 1.2%
- (c) 誤差検出回路の損失 2.0%
- (d) 発振回路中の OFF 時間制御用トランジスタ  $T_{r2}$  による損失 3.8%

(a) のスイッチング素子による損失を少なくするためには、トランジスタ  $T_{r1}$  はきわめて周波数特性のよいこと、すなわち立上り時間、立下り時間が短く、またコレクタとエミッタ間の飽和抵抗の低いことが望ましい。

このような要求を満たすトランジスタとして幾種類かの電力トランジスタなどが考えられるが本研究では第2図に示すようにシリコン、メサ形の 2SC161 を使用している。

(b) の抵抗損についてはチョークコイル  $L_1$  の巻数が少ないほど小さい値におさえられるが、巻数を減らすとリップルが増加するので好ましくない。また繰り返し周波数を高くすれば  $L_1$  もわずかで済み抵抗損も減少するが繰り返しが早くなることによってスイッチング損失の増加を伴うのでこれにも限度がある。したがって巻線はなるべく線径の太いものを使い抵抗分を減少させることが望ましい。

(c) 誤差検出回路については損失を少なくすることも必要であるが、電源の出力が特に小さくない限り、むしろ安定性に重点を置いた方が賢明であろう。

(d) 発振回路の損失は当初無視できるものと考えていたが、OFF 時間制御用トランジスタ  $T_{r2}$  における損失が比較的大きいので、この点を改良すればさらに効率を上昇させ得ると考えられる。

## 5. あとがき

人工衛星用安定化電源は電力変換効率の高いことが大切であるが、本研究では効率として約 90% というほぼ満足できる値が得られている。しかし発振回路の損失がやや割合大きいのでこの点についてはなお改良の余地がある。

第2図の回路では OFF 時間制御のためにトランジスタを使用しているが、このトランジスタの代わりに、たとえば傍熱形サーミスタ（消費電力約 100 mW）を使用すれば損失は 1% 前後におさえられる。この方法は誤差出力をサーミスタのヒーターに導き、ヒーター温度によるサーミスタ抵抗の変化を利用して周波数を制御するもので、誤差出力から発振回路への帰還ループが直流的に切離されるので調整が簡単になる。ただし周波数応答の点ではまだやや劣っている。

また OFF 時間制御用に対数ダイオードを用いることもできる。この場合は制御のために消費される損失はほとんど無視できるので、やはり効率をより高くできる見込みである。

これらの諸方式については目下検討中である。

本研究を行なうにあたり種々ご協力をいただいた日本電気人工衛星部の諸氏、ならびにフェライト磁心についてご援助を賜った東京電気化学、柄沢氏に深甚の謝意を表す。

1966 年 9 月 14 日 宇宙工学