

## 【特別寄稿】

# 給電装置用DC-DCコンバータ

The DC-DC Converter for Power Feeding Equipment



顧問

小林 和雄

Kobayashi Kazuo

### あらまし

国際的な情報伝送の増大に対し、海底光伝送システムが多く採用されている。その中で海底光中継器に電力を供給する給電装置は重要な役割を果たしている。

給電装置は光中継器に安定した電力を供給する役割のほかに、伝送ルート/給電ルートの切替えや海底光ケーブルの障害探索などにも使われている。

そのために給電装置には低電流領域での安定性や制御の直線性が要求されている。

本稿では給電装置の構成、直列および並列共振型コンバータの比較、制御特性の改善およびフィードバック制御について述べる。

### Abstract

Submarine optical-fiber transmission systems are finding greater application in supporting an increasing volume of global-level data transmission. The power feeding equipment that supplies power to submarine repeaters now plays a key role in the operation of communication systems.

Besides the role to supply a steady electric power to the optical repeaters, the power feeding equipment is used for switching the transmission route, the power feeding rout and finding the fault location of optical fiber,

As for the power feeding equipment, the stability of the low current range and the linearity of the control are demanded by the above-mentioned reason.

This paper describes the composition of the power feeding equipment, the comparison between series and parallel resonant converter, the improvement of the linearity of control characteristics and the stability of feedback control.

## 1. ま え が き

給電装置は高電圧定電流で陸上端局より直列接続された海底光中継器REPに電力を供給している。帰路は大地を利用している。

このために局舎電源DC48Vから10～15kV、1Aに変換する定電流DC-DCコンバータが必要である。

給電装置は光中継器に安定した電力を供給することは当然であるが、伝送ルート/給電ルートの切替えや海底光ケーブルの障害探索などにも使われるので、低電流領域でも安定した電力の供給が必要である。

## 2. 給 電 装 置

図1に海底光伝送システムの給電方式を示す。

給電装置は両端局に設置され、両局よりそれぞれ正負のほぼ等しい電圧で海底光中継器REPへ定電流で電力を供給している。

一方、給電装置の障害時は伝送システムが短距離の場合は片端局より、長距離の場合は予備機に切替えて両端局より給電する。

この電圧に対応するために定電流コンバータCONVが最大15台直列接続されており、5台に1台の割合で冗長されている。また、CONVの障害時や保守時には活性挿抜ができる。

図2に給電装置のブロック図を示す。

フィードバック制御系は3系統で冗長運転されて

おり、1系統が短絡/開放など如何なる障害が発生しても制御系には影響を与えない。3系統の制御電流 $I_{c1-3}$ は合算され $I_c$ とし、各CONVへ送り込まれ、制御電圧 $V_c$ に絶縁変換される。

監視系については3系統で冗長運転し、1系統の障害に対しても監視機能に影響を与えない。重要な出力電流/電圧のシャットダウンのようなメジャーアラームには多数決原理を採用して2系統の異常検出によりシャットダウンしている。

給電装置の役割として、1)中継器への電力供給のほか、2)ソフト起動・ソフト停止、3)低い電流と極性制御による伝送ルート/給電ルートの切替え、4)ケーブル障害時の位置の特定、5)交流重畳によるケーブル布設位置の探索などがある。

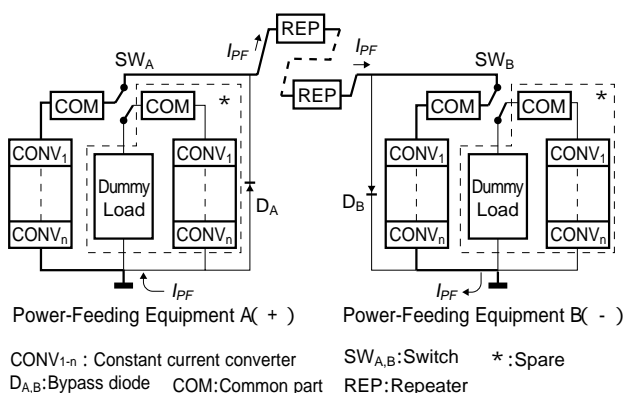


図1 海底光伝送システムの給電方式

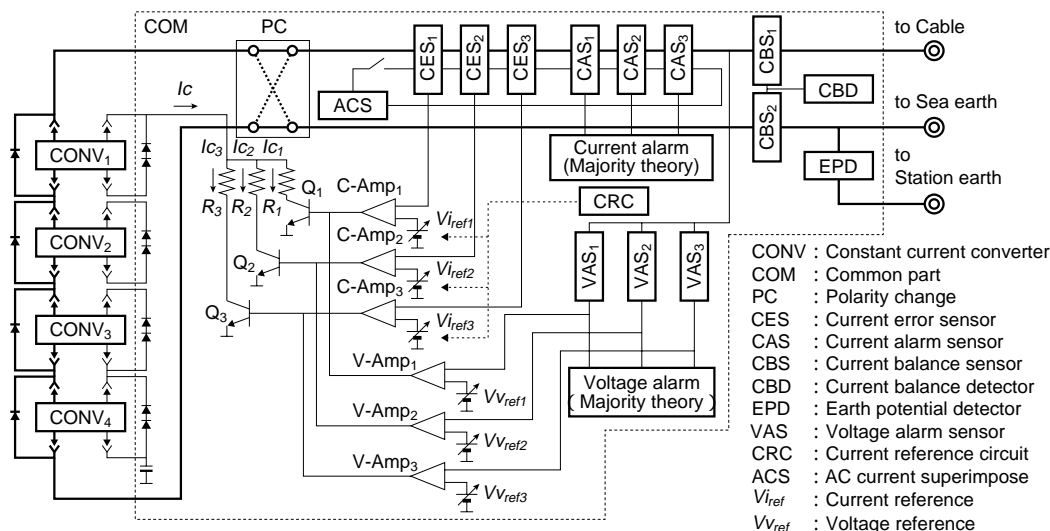


図2 給電装置のブロック図

これらに対応するためには0から給電電流の制御が必要である。以下、これらに適した定電流コンバータについて述べる。

### 3. 定電流コンバータ

コンバータの具備する条件として定電流給電であるので、1) コンバータ自身が定電流特性を有すること、自然空冷装置であるので2) 効率が良いこと、3) 雑音・騒音が少ないことである。

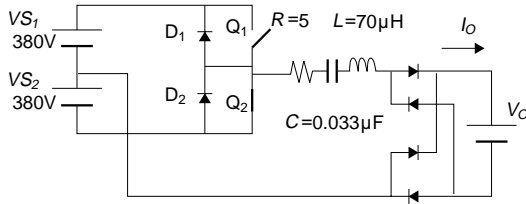
2), 3) を満足するには共振型コンバータが適し

ている。共振型コンバータには図3、図4に示すように直列型と並列型がある。直列型は負荷に対してLCの直列共振、並列型は並列共振である。

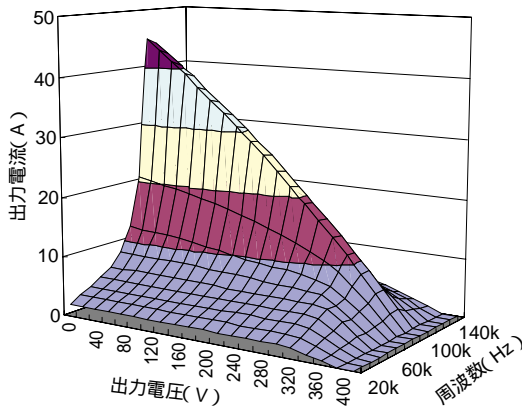
図4(b)で分かるように、並列共振型では出力電流  $I_o$  の変化に対して出力電圧  $V_o$  の変化は少なく、定電圧の特性をもっている。

一方、図3(b)で分かるように、直列共振型では  $V_o$  の変化に対して  $I_o$  の変化は少ない。定電流の特性をもっているので給電装置用コンバータとして適している。

(a)直列共振型コンバータ回路図



(b)直列共振型コンバータ特性



(c)直列共振型コンバータ波形 (  $f=40\text{kHz}$ ,  $V_o=200\text{V}$  )

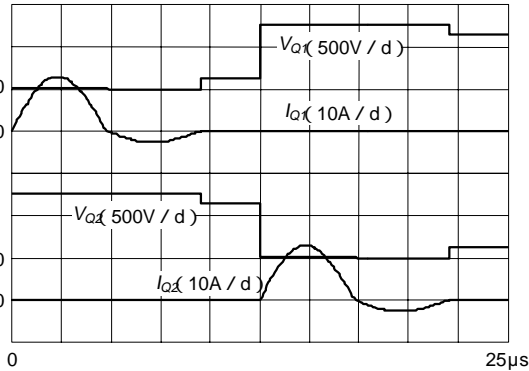
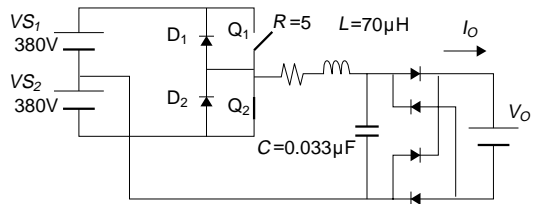
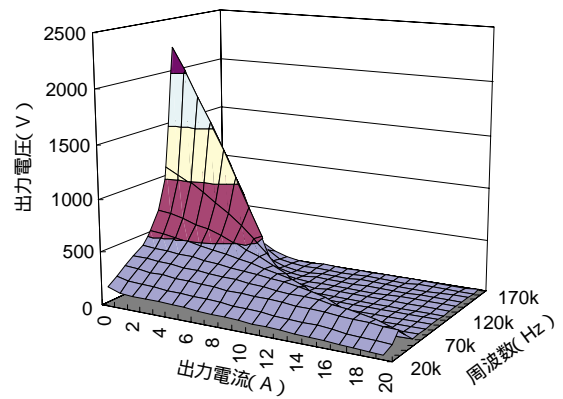


図3 直列共振コンバータ

(a)並列共振型コンバータ回路図



(b)並列共振型コンバータ特性



(c)並列共振型コンバータ波形 (  $f=40\text{kHz}$ ,  $I_o=10\text{A}$  )

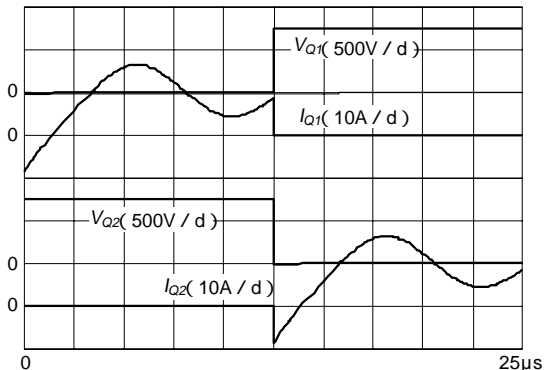


図4 並列共振コンバータ

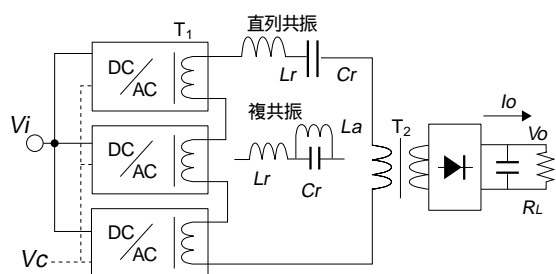


図5 コンバータ回路

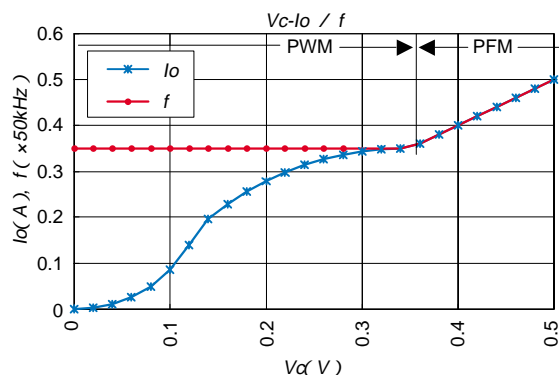


図8 PFM-PWM併用の特性

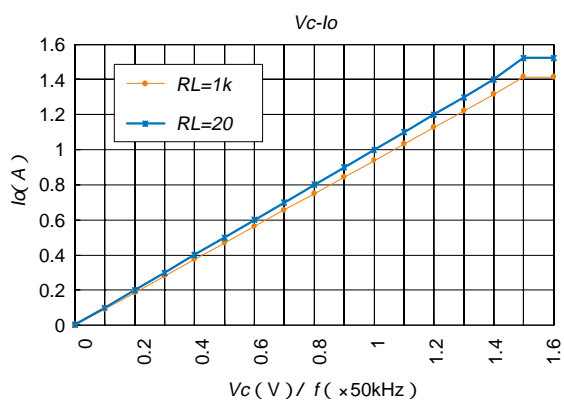


図6 PFMの特性

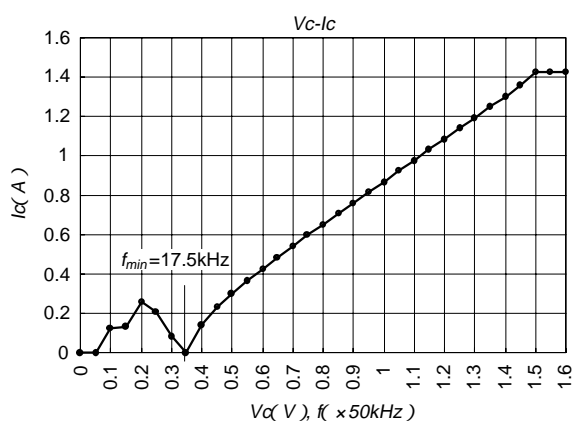


図9 複共振の特性

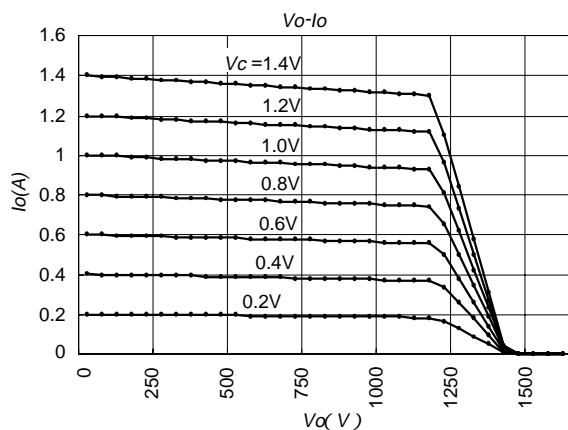


図7 Vo-io特性 (Vcパラメータ)

### 3.1 コンバータの電流制御

図5に示すように1台のコンバータは容量アップのために3台のDC-ACインバータで構成され、インバータトランス $T_1$ の二次側で直列接続され $L_r$ ,  $C_r$ の共振回路を挿入後、高圧トランス $T_2$ で絶縁昇

圧し、整流平滑される。

電流制御方式には周波数制御 (PFM), 周波数制御 (PFM) とパルス幅制御 (PWM) の併用, 複共振の方法がある。

#### 1) 周波数制御 (PFM)

図6に制御信号 $V_c$ と出力電流 $i_o$ の関係を示す。

図7は制御電圧 $V_c$ をパラメータとした $V_o$ - $i_o$ 特性である。図6で分かるように $V_c$ - $i_o$ の直線性は良い。しかし、低電流出力領域では動作周波数 $f$ を低下させる必要があり、リップル電流の増大、騒音の増大、インバータトランスの飽和等の問題がある。

#### 2) PFM-PWM併用

動作周波数 $f$ を可聴周波以上 (ここでは17.5kHz) で動作させ、低電流出力領域ではPWM制御する。図8に示すようにPWM領域では図3(c)の正弦波電流のPWM制御により、正弦波状に非直線となる。 $V_c > 0.35V$ ではPFMのため直線であるので $0 < V_c < 0.5V$ の範囲を拡大した。

#### 3) 複共振

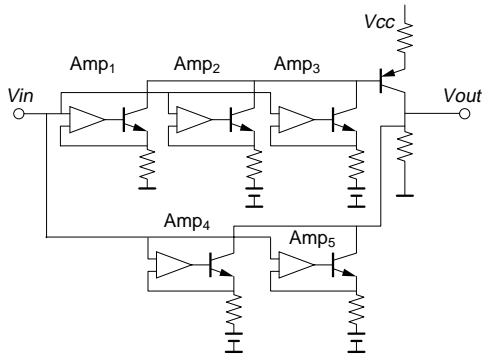


図10 PFM-PWMの補正回路

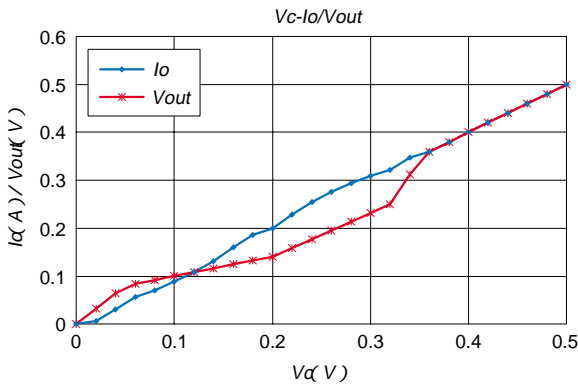


図11 PWMの補正特性と補正後の特性

図5の  $L_r, C_r$  の直列共振回路の代わりに、 $L_r, C_r$  に  $L_a$  を追加して複共振を利用する方法である。 $L_a, C_r$  の並列共振により、共振周波数近傍でインピーダンスが急に上昇し、エネルギーの伝達を抑える。この特性を図9に示す。並列共振を最低動作周波数  $f_{min}$  として、それ以上で動作させる。

3.2 直線性の補正

PFM-PWM 制御および複共振ともに  $V_c-I_o$  の直線性が悪いので直線補正の必要がある。

図10に PFM-PWM 制御の直線補正の回路を示す。

制御信号  $V_c$  を  $V_{in}$  に入力し、 $V_{in}$  を電流変換後、加算 (Amp<sub>1-3</sub>)、減算 (Amp<sub>4,5</sub>) し、補正出力を  $V_{out}$  とする。補正式は下式である。図8の  $I_o$  を直線近似補正した結果を図11に示す。

$$V_{out} = \frac{1}{0.627} V_{in} - \frac{1}{0.842} (V_{in} - 0.05) + \frac{1}{1.98} (V_{in} - 0.2) + \frac{1}{0.344} (V_{in} - 0.325) - \frac{1}{0.355} (V_{in} - 0.35)$$

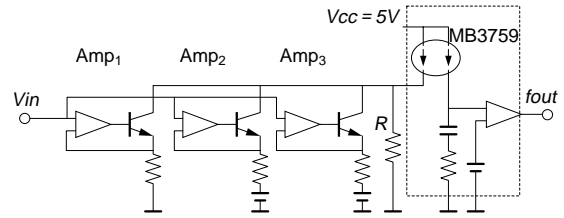


図12 複共振の補正回路

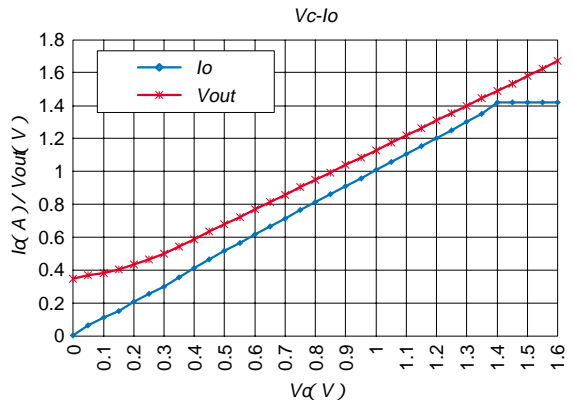


図13 複共振の補正特性と補正後の特性

表1 定電流コンバータの特長

項目	PFMのみ	PFM・PWM併用	複共振
電力部品数			×
騒音・リップル	×		
インバータランスの飽和	×		
直線性補償	不要	要	要

図12に複共振の補正回路を示す。 $V_{in}$  を電流変換後加算し、電流-周波数変換器 (MB3759) を通して周波数変換している。 $R$  は最低動作周波数  $f_{min}$  を決めている。補正式は下式である。その補正特性と補正後の特性を図13に示す。

$$f_{out} = \left\{ \begin{aligned} & \frac{5}{14.3} + \frac{1}{2.883} V_{in} - \frac{1}{3.519} (V_{in} - 0.144) \\ & + \frac{1}{3.699} (V_{in} - 0.3026) \end{aligned} \right\} \times 50\text{kHz}$$

図10、図12に示す回路を  $V_c$  の後に挿入することによって直線性が改善され、良好なソフトスタート・ストップ特性、交流重畳特性が得られる。

3.3 コンバータのまとめ

表1に定電流共振コンバータの特長をまとめた。

PFM・PWM 併用方式のコンバータにより給電装置を構成し、英～独間、中～米間、日～米間および東南アジア諸国間の海底光伝送システムに多数納

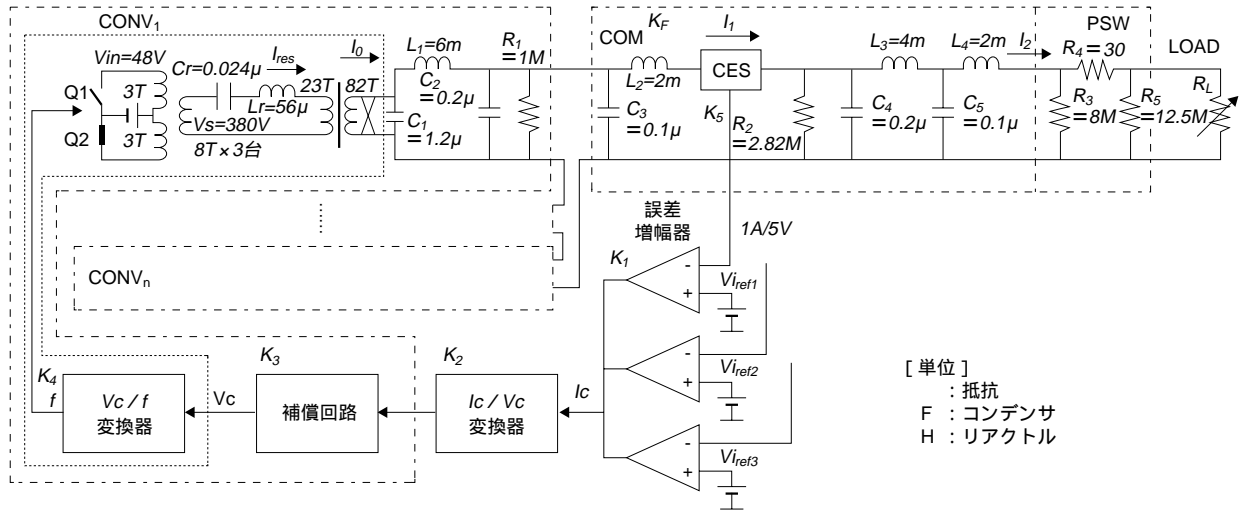


図14 給電システムのブロック図

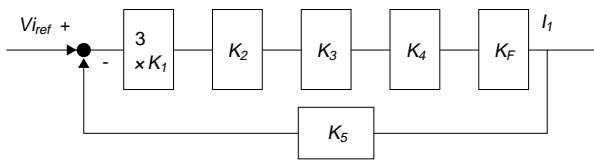


図15 Viref - I1のブロック図

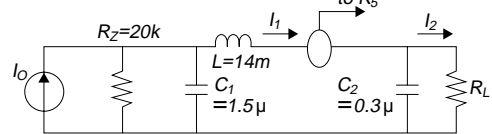


図16 簡略化フィルタ回路

入してきた。今後更に高電圧化と低価格化が要求されている今日、複数インバータの位相シフト方式による高周波化を図り、騒音・リップルの改善、インバータトランスの削除など、PFMのみや複共振方式の検討も必要である。

#### 4. 制御系の安定性

本章では給電システムの電流制御の安定性について述べる。図14に給電システムのブロック図を示す。

##### 4.1 伝達関数

誤差増幅器を  $K_1$  ,  $I_c / V_c$ 変換器を  $K_2$  , 補償回路を  $K_3$  ,  $V_c / f$ 変換器およびコンバータを  $K_4$  , フィルタ回路を  $K_F$  , 電流検出器CESを  $K_5$  とする。

$V_{iref}$  に対する  $I_1$  の関係をブロック図で表すと図15となる。前述のように制御系を冗長運転するために電流検出器CESおよび誤差増幅器が並列接続されている。これは1台の利得の3倍と考えられる。

入力変動  $\pm 15\%$  , 制御系3系統中1系統の障害、コンバータ2台中の1台障害を考慮して出力電流精

度を  $\pm 0.1\%$  以内に入れるためには、直流利得300 (50dB) が必要である。

各伝達関数を  $s$  表示すると下式となる。( ) 内は単位を示す。

$$K_1 = 3 \times 2 \times \frac{1}{1 + 0.042s} \text{ (mho)}$$

$$K_2 = 10 \times \frac{1}{1 + 0.00218s} \text{ (ohm)}$$

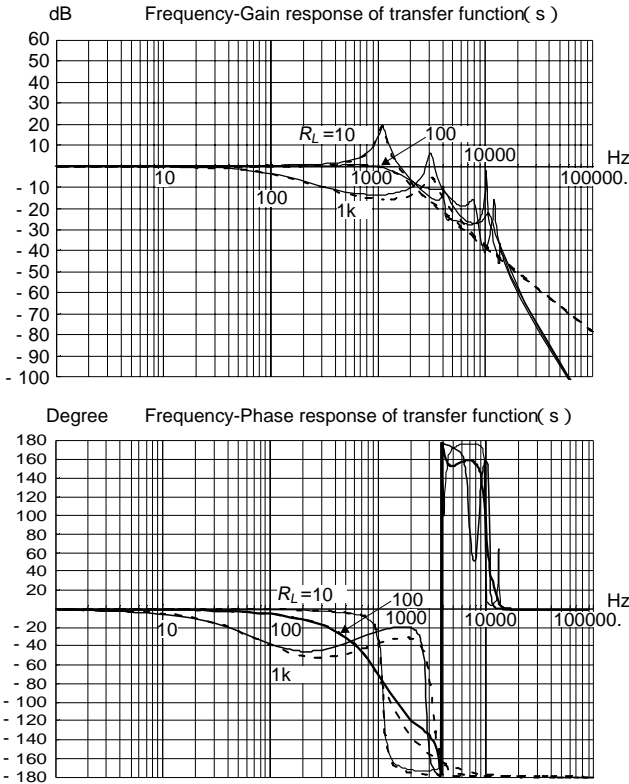
$$K_3 = \frac{1 + 0.01s}{1 + 0.001s} \text{ (ratio)}$$

$$K_4 = \frac{1 + 0.022s}{1 + 0.1364s} \text{ (mho)}$$

$$K_5 = 5 \times \frac{1}{1 + 0.00016s} \text{ (mho)}$$

図14のフィルタ部の伝達関数  $K_F$  については影響の少ない抵抗分を無視し、定電流特性の勾配を  $R_2$  ( $=20k$  : 計算値) で置き、ラプラス逆変換の容易さから低次の3次までをとって近似すると図16のように簡略化できる。

負荷抵抗の小さい領域では図16の  $C_1$  と  $L_1$  の共



(実線：詳細計算点, 点線：簡略化)

図17 フィルタの利得-位相特性

振, 大きい領域では  $L_1$  と  $C_2$  の共振と考えられる。フィルタの伝達関数  $K_F$  は下式となる。

$$K_F = \frac{1+sC_1R_L}{1+\frac{R_L}{R_Z}+s\left[C_1R_L+C_2R_L+\frac{L}{R_Z}\right]+s^2\left[C_1L+\frac{C_2LR_L}{R_Z}\right]+s^3C_1C_2LR_L}$$

図17に詳細(実線)と簡略化(点線)の利得-位相特性を示す。

$V_{i_{ref}}$  から  $I_1$  までの閉ループの伝達関数  $K_T$  は下式で表され, そのボード線図は図18となる。

$$K_T = \frac{3 \times K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_F}{1 + 3 \times K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_F}$$

図17で分かるように  $R_L = 1k$  の場合, 位相遅れが生じるため位相余裕の点で厳しいので,  $1k$  について検討する。

図18より, 利得0dBを横切る周波数は100Hzで位相余裕は40°であり, 系は安定といえる。また, 全負荷範囲において周波数範囲4~50Hzで振幅

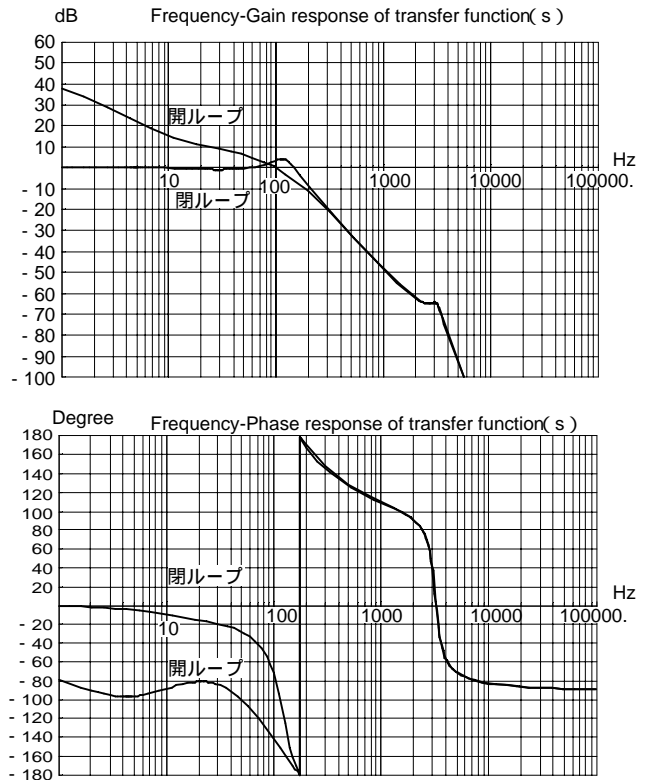


図18 制御系全体のボード線図 ( $R_L = 1k$ )

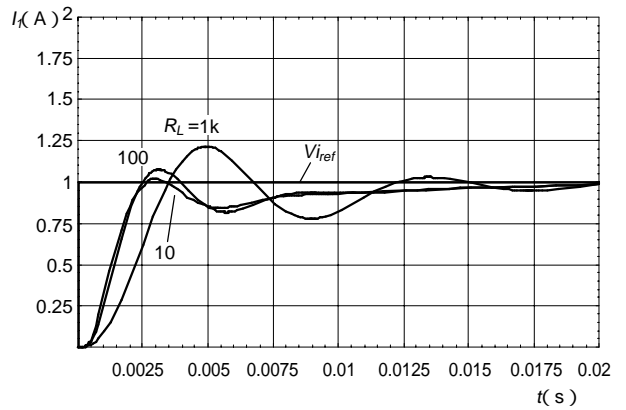


図19 インディシャル応答

は  $\pm 1.5\text{dB}$  以内である。

#### 4.2 インディシャル応答

閉ループにおいて  $V_{i_{ref}}$  に1Vを印加したときのインディシャル応答は  $K_T / s$  をラプラス逆変換して求まる。その結果を図19に示す。

#### 4.3 安定性のまとめ

一次進み-一次遅れの補償回路  $K_3$  を挿入することによって, 図18のボード線図および図19のインデ

エシヤル応答からみて、系は安定しているといえる。

## 5. む す び

海底光伝送システムの給電装置用コンバータには定電流コンバータが用いられ、そのコンバータは直列共振型が適している。コンバータは低電流領域から定格電流出力まで制御特性が直線性を保つ必要があり、その補正法を明確にした。

また、広範囲な負荷でフィードバック系を安定動作させるためにはフィルタ回路を簡略化し、位相余裕、インディシヤル応答を求めることによって実証した。

## 参考文献

- 1) K.Kobayashi, Y.Arai, Y.Saito, Y.Hatamoto and K.Abe : "TWO TYPES OF CONTROL IN THE CURRENT MODE RESONANT CONVERTER" pp.345-353, Intelec '91, Nov.1991.
- 2) 小林 和雄, 千田 潤, 新井 康浩, 斉藤 義勝, 畑本 義行 : 『直列共振コンバータのPWM制御動作解析』電子情報通信学会論文誌B- VOL.J80-B- NO.11 pp.801-808 1997年11月 .