

## 低温度差熱エネルギーを用いた超小型バイナリー発電プラントのモデリングと 非干渉化 PID 制御系の設計

韓 建榮<sup>\*1</sup>, 有田 護<sup>\*2</sup>, 池上 康之<sup>\*3</sup>, 李 義頡<sup>\*1</sup>

### Modeling and Design of Decouple PID Control for Ultra Compact Binary Power Plant Using Low Temperature Difference Thermal Energy

Kun-Young HAN<sup>\*1</sup>, Mamoru ARITA<sup>\*2</sup>, Yasuyuki IKEGAMI<sup>\*3</sup>, and Hee-Hyol LEE<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Graduate school of Information, Product and Systems, Waseda University  
2-7 Hibikino, Wakamatsu-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka 808-0135, Japan

<sup>\*2</sup> Kyushu Electronic Technology Co., Ltd.

<sup>\*3</sup> Institute of Ocean Energy, Saga University

Linear transfer function models of three inputs-two outputs of a 10KW class ultra-compact binary power plant are built to design control system in this paper. Decouple PID control systems using pre-compensators with parallel connection for linearized transfer function matrix models are designed to reduce the interaction of a multivariable control plant. In addition, control results of two inputs-two outputs system and three inputs-two outputs system are compared to confirm the control performance.

**Key Words** : Low temperature difference, Ultra compact binary power generation, Decouple PID control

## 1. 緒 言

近年, 化石燃料枯渇問題や環境問題などから, 再生可能エネルギーとして未利用熱エネルギーの有効活用が益々注目されている. 未利用熱エネルギー源としては, 海洋表層深層温度差熱や工場廃熱, 温泉熱などがある. これらの未利用熱エネルギーを用いた発電は, 火力発電や原子力発電と比べて, その熱源と冷却源の温度差が非常に低いため熱効率が低く, 発電量あたりのコストが高くなる. 現在までのところ, 熱エネルギーを用いた発電として, 100 万 KW 級の大規模地熱発電から 50 KW 級までの小型発電は実用化されているが, 小規模工場や温泉旅館でも設置可能な 10 KW 級の超小型バイナリー発電プラントの実用化には至っていない. それは, 低温度差熱エネルギーであっても, 他の再生可能エネルギーと比べ, 安価に, また安定に発電が維持できる熱交換器, タービン, ポンプなどにより構成された熱サイクルユニットの開発や作動媒体の選定, 制御システムが十分に開発されていないためである.

一方, このような発電プラントは多入力多出力多変数システムであり, また非線形特性, 無駄時間特などを有する動特性が複雑な制御対象である. これまでこのようなプラントに対し, 非線形モデルと BP を用いた制御手法<sup>[1-2]</sup>が提案しているが, 発電プラント全体の動特性を表す線形化モデルと制御方法は, 未だ開発されていない.

そこで本研究では 発電プラントの動作点近傍における動特性を十分に捉えた線形化伝達関数行列モデルを導出し, 操作量と制御量間の顕著な相互干渉を考慮した非干渉化 PID 制御系を設計する. 更に, 制御量の数よりも操作量の数が多い制御系の制御性能について検討する.

\* 原稿受付 2013 年 8 月 21 日

<sup>1</sup>早稲田大学大学院情報生産システム研究科 (〒808-0135 福岡北九州市ひびきの 2-7)

E-mail: kyhan@akane.waseda.jp

<sup>2</sup>九州電子技研株式会社

<sup>3</sup>佐賀大学海洋エネルギー研究センター

## 2. 超小型バイナリー発電パイロット・プラントの構成

本研究で対象とした超小型バイナリー発電パイロット・プラントは、蒸発器、凝縮器、再生器、分離器、タービン、温水・冷水・作動流体ポンプ、作動流体タンク等により構成されている(図1)。操作量は温水ポンプ回転数と冷水ポンプ回転数、及びタービン入口電磁弁開度、制御量はタービン入口圧力と出口圧力であり、制御目的は、これら3つの操作量を用いて2つの制御量を所望の目標値に追値させることである。タービン入口出口圧力を制御する操作量を適切に調節する制御系を設計するためには、制御対象プラントの動特性を表す数学モデルが必要である。そこで、次章以降、超小型バイナリー発電パイロット・プラントの線形化伝達関数行列モデルの構築、及び制御系設計について述べる。

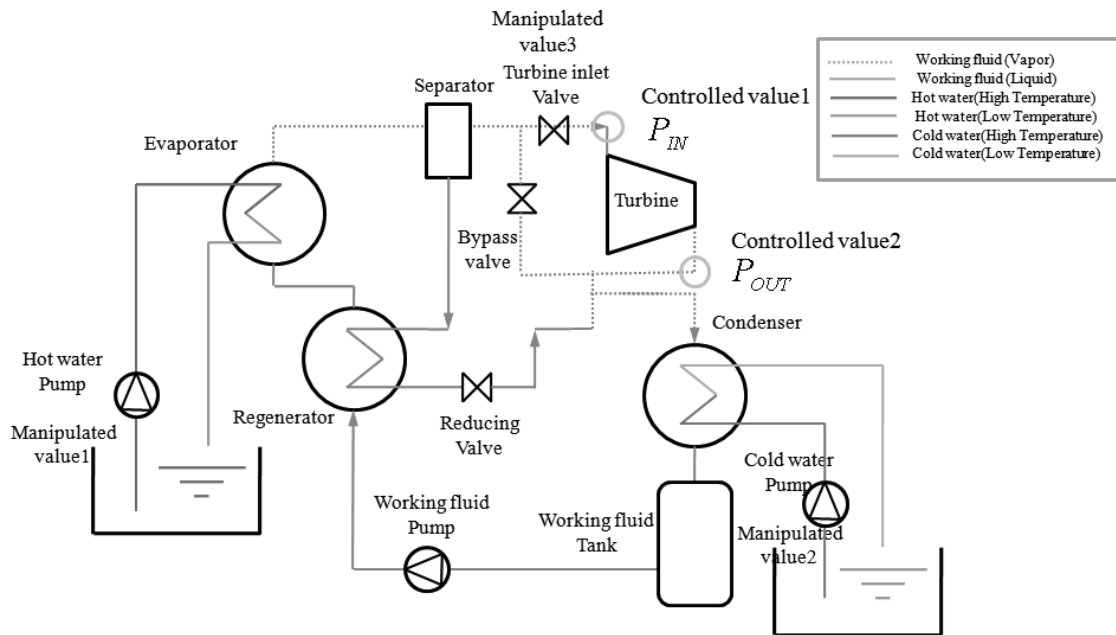


Fig. 1 Structure of ultra-compact binary power generation system using low temperature difference thermal energy

## 3. 超小型バイナリー発電パイロット・プラントのモデリング

### 3.1 ステップ応答の測定

線形化伝達関数行列モデルを構築するためのステップ応答測定実験は、次の条件で行った。まず、熱源である温水量 (60°C) をステップ状 [60 l/min (10Hz) → 283 l/min (60Hz)] に加え、タービン入口出口の圧力ステップ応答を測定する。このとき、冷水量 [265 l/min (60Hz)] と作動流体量 [ポンプ回転数 60 Hz] は一定、タービン入口電磁弁は全開 [100%] とする。次に、冷却源である冷水量 (8~9°C) をステップ状 [120 l/min (20Hz) → 265 l/min (60Hz)] に加え、タービン入口出口の圧力ステップ応答を測定する。このとき、温水量 [240L/min(50Hz)] と他の変量は一定とする。更に、電磁弁の開度をステップ状 [40%→100%] に加え、タービン入口出口の圧力ステップ応答を測定する。このとき、その他の変量は一定とする。測定においては、入力投入2分後にステップ状にし、定常状態に至る4分間計測した。このときのサンプリング周期は3秒、データ数は240個である。

### 3.2 3入力2出力線形化伝達関数行列モデルの構築

ここでは3入力2出力線形化伝達関数行列モデルを導出する。そのブロック線図を図2に示す。また、温水量ステップ入力、冷水量ステップ入力、及びタービン入口電磁弁ステップ入力により測定したタービン入口出口圧

力のステップ応答を図3, 4, 5に示す. 但し, 冷水量ステップ入力, タービン出口圧力を低下させる作用をするので負の値としている.

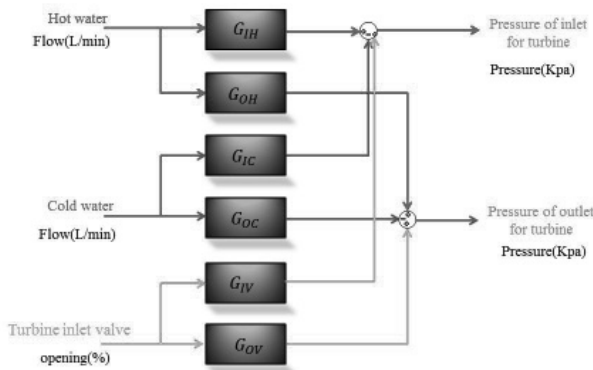


Fig. 2 Block diagram of 3inputs-2outputs transfer function model

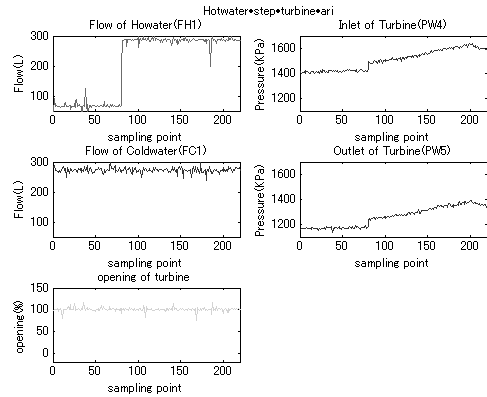


Fig. 3 Real response by Hot water step input

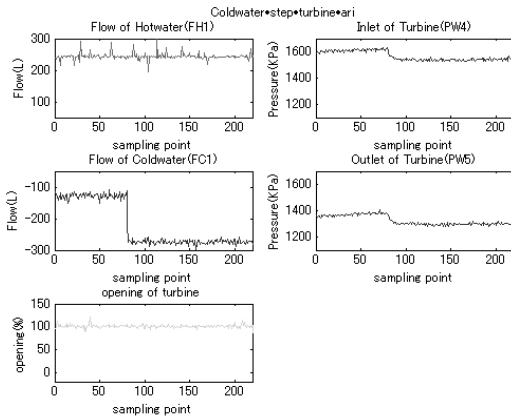


Fig. 4 Real response by Cold water step input

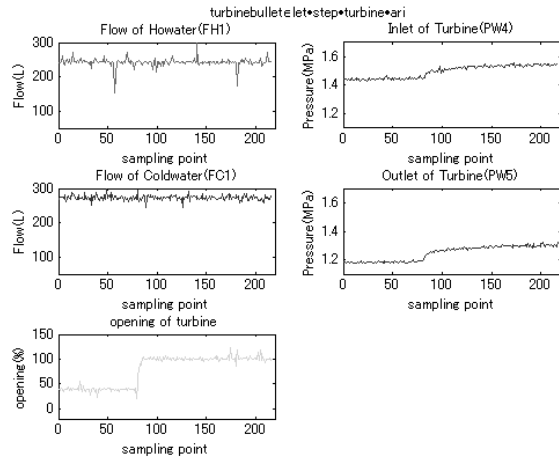


Fig. 5 Real response by Solenoid valve step input

この実ステップ応答に対してバイアスを除去し, 式 (1) の  $G_1(s)$  を用いて一次遅れ+無駄時間要素でモデル化すると共に, 振動成分に対しては2次振動要素  $G_2(s)$  でモデル化する. また, 温水量を加えたときは一定速度で立ち上がる応答が見られるため, それは積分要素  $G_3(s)$  を用いてモデル化し, それらを並列で結合する.

$$G_1(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-Ls}, \quad G_2(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2}, \quad G_3(s) = \frac{1}{Ts} \quad (1)$$

ここで,  $T, K, L, w_n, \zeta$  は各々, 時定数, ゲイン, 無駄時間, 固有角周波数, 減衰比を表す. まず, 図6を用いて  $G_1(s)$  の  $T, K, L$  を算出する. また, 2次振動要素の  $w_n, \zeta$  に対しては, 図7を用いて  $G_2(s)$  を求め, 一定速度で立ち上がるステップ応答に対しては, 図3よりモデル化する. 温水量ステップ入力によるタービン入口圧カステップ応答から得られた結果を式(2)に示す.

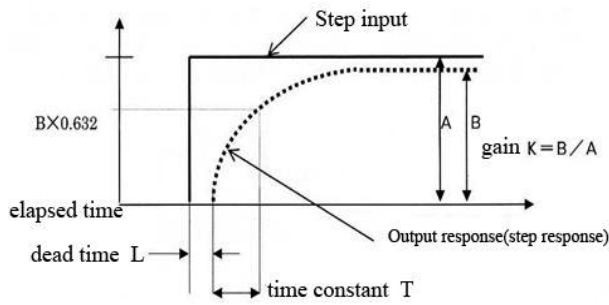


Fig.6 Deducing method of 1st order + dead time transfer function

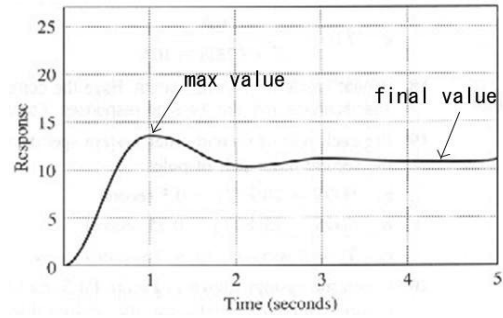


Fig.7 Deducing method of 2nd order transfer function

$$\text{但し, } \zeta = \frac{-\ln(\%OS/100)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(\%OS/100)}}, \quad \%OS = \frac{\text{max value} - \text{final value}}{\text{final value}}, \quad \omega_n = \frac{4}{Ts\zeta}$$

$$G_1(s) = \frac{0.28}{0.01s + 1} e^{-0.01s}, \quad G_2(s) = \frac{12}{s^2 + 1.25s + 12}, \quad G_3(s) = \frac{0.0056}{s} \quad (2)$$

この伝達要素の並列接続より、温水量入力とタービン入口圧力出力間の伝達関数は、式 (3) になる。

$$G_{III} = \frac{0.000056s^3 + 0.005663s^2 + 3.367s + 0.0672}{0.01s^4 + 1.007s^3 + 1.245s^2 + 12s} e^{-0.01s} \quad (3)$$

他の線形化伝達関数モデルも同様に得られる。

$$G_{OH} = \frac{0.000057s^3 + 0.00574s^2 + 3.14s + 0.0672}{0.01s^4 + 1.007s^3 + 0.81s^2 + 11s} e^{-0.01s}$$

$$G_{IC} = \frac{10}{2.5s^3 + 1.25s^2 + 50s + 20} e^{-0.001s}, \quad G_{OC} = \frac{3}{2.5s^3 + 2.9525s^2 + 15.77s + 6} e^{-0.001s}$$

$$G_{IV} = \frac{22.5}{11s^3 + 1.22s^2 + 165s + 15} e^{-0.01s}, \quad G_{IV} = \frac{86.4}{12.5s^4 + 4.5s^3 + 600.3s^2 + 48s} e^{-0.01s} \quad (4)$$

得られた線形化伝達関数モデルのステップ応答と測定した実ステップ応答の比較を、図 8, 9, 10 に示す。

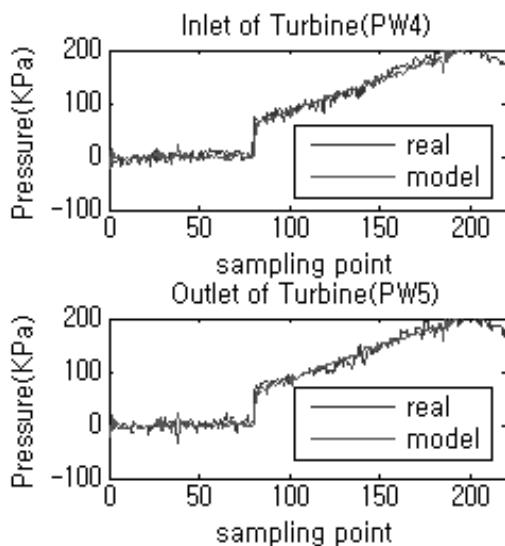


Fig. 8 Responses of Real and Model by Hot water step input

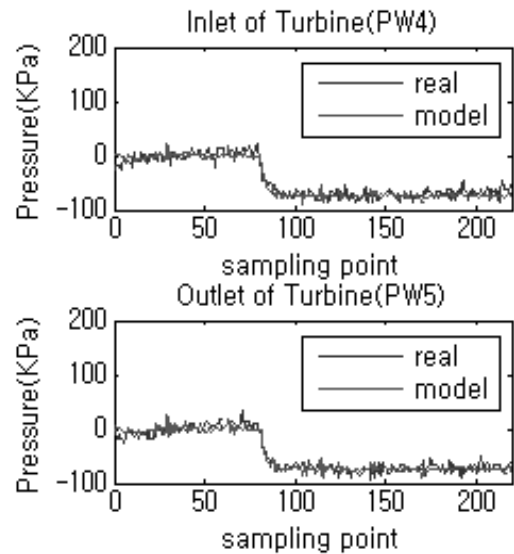


Fig. 9 Responses of Real and Model by Cold water step input

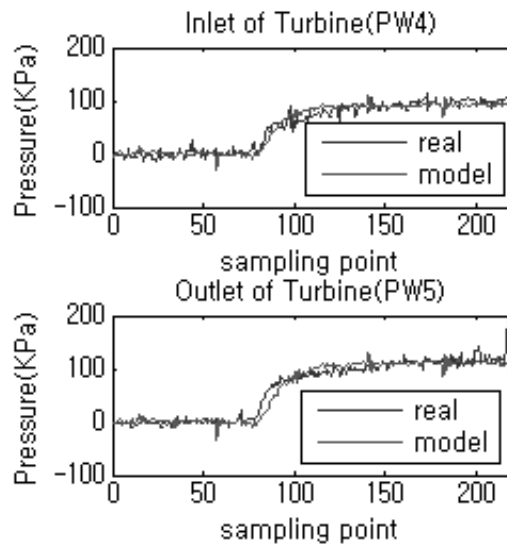


Fig. 10 Responses of Real and Model by solenoid valve step input

#### 4. 非干渉化前置補償器の多段階接続

対象としている発電プラントは多入力多出力多変数システムであり、このプラントにおける温度、圧力、流量などの操作量や制御量は相互に干渉しあう場合が多い。このようなシステムに対して制御性能を高めるためには、それら強い相互干渉を取り除く対策を必要とする。そこで、これら強い相互干渉を積極的に打ち消す制御器として、INA（逆ナイキスト配列）を用いて周波数領域で設計された非干渉化前置補償器が有効である。その設計法である一般化擬似対角化法は、必ずしも入力数と出力数が等しいとは限らない一般の多入力多出力制御対象を非干渉化する擬似対角化法で、出力数と等しい固有値問題に帰着させ、非干渉化前置補償器を設計する。この時、完全な非干渉化を達成することは困難なので、一巡伝達関数行列における対角成分の絶対値より非対角成分絶対値の行(列)総和が小さい対角行(列)優勢によって、非干渉化の程度を判定する<sup>[3]</sup>。

##### 4.1 一般化擬似対角化による非干渉化前置補償器設計と対角行(列)優勢判別

本研究では、3入力2出力伝達関数行列モデル式(5)に対して、一般化擬似対角化と逆ナイキスト配列により非干渉化前置補償器を設計する。

$$Gp(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.000056 s^3 + 0.005663 s^2 + 3.367 s + 0.0672}{0.01 s^4 + 1.007 s^3 + 1.245 s^2 + 12 s} e^{-0.01s} & \frac{10}{2.5 s^3 + 1.25 s^2 + 50 s + 20} e^{-0.001s} & \frac{22.5}{11 s^3 + 1.22 s^2 + 165 s + 15} e^{-0.01s} \\ \frac{0.000057 s^3 + 0.00574 s^2 + 3.14 s + 0.0672}{0.01 s^4 + 1.007 s^3 + 0.81 s^2 + 11 s} e^{-0.01s} & \frac{3}{2.5 s^3 + 2.9525 s^2 + 15.77 s + 6} e^{-0.001s} & \frac{86.4}{12.5 s^4 + 4.5 s^3 + 600.3 s^2 + 48 s} e^{-0.01s} \end{bmatrix} \quad (5)$$

まず、他方の制御量を外乱とみなしてループ毎にPID制御器を設計しPID制御を行った結果を図11に示す。

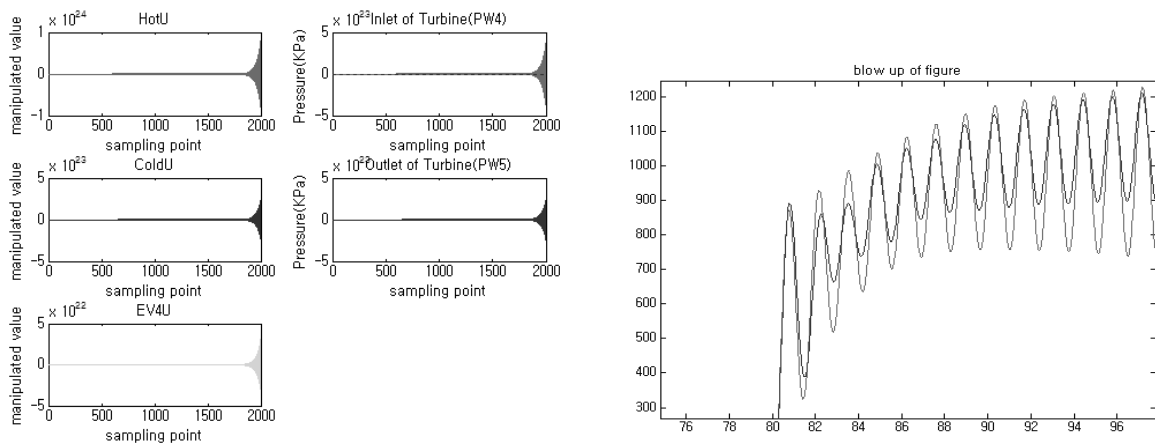


Fig. 11 PID control result of 3input 2out system

図 11 は、プラントにおける温度、圧力、流量などの制御量が相互に干渉しあい、PID 制御では安定した制御が困難であることを示している。従って、何らかの非干渉化の対策が必要となる。このときの振動周期は 1.46 秒であり、この PID 制御結果から得られたハンチング周波数  $\omega_{01}=4.3$  を用いて非干渉化前置補償器  $G_{c1}$  を設計する。一般化擬似対角化法により設計した前置補償器  $G_{c1}$  は式(6) のようになり、このときの逆ナイキスト線図とグリシュゴリン帯を図 12 に示す。

$$G_{c1} = \begin{bmatrix} -0.0127 & -0.7259 \\ -0.2071 & -0.0689 \\ 0.9782 & -0.6843 \end{bmatrix} \tag{6}$$

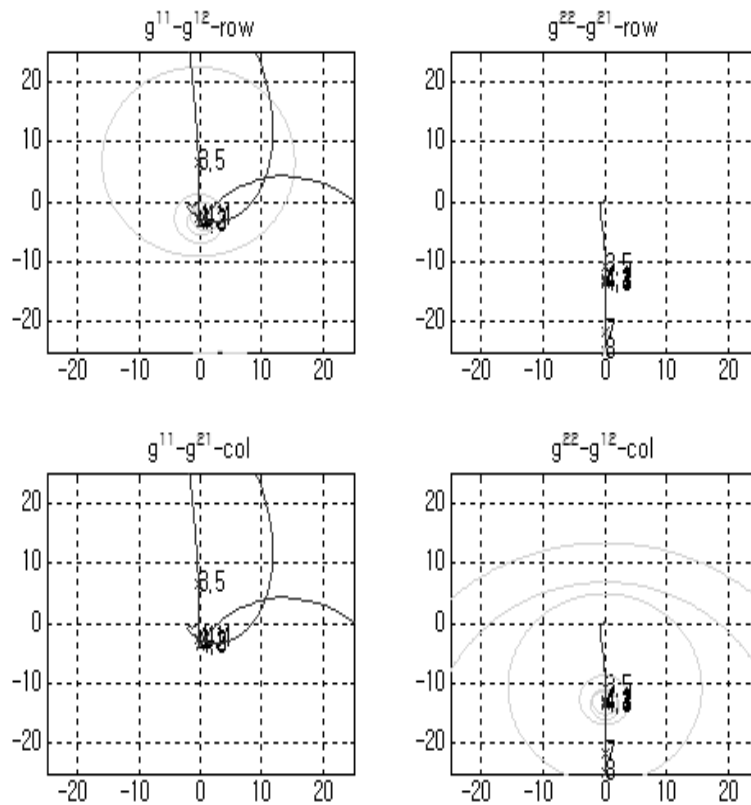


Fig. 12 Inverse Nyquist Array and Gershgorin band by  $G_{c1}$

#### 4.2 非干渉化前置補償器の多段階接続

制御量間の相互干渉が著しい制御対象に対しては、一つの前置補償器で非干渉化が達成できない場合が多い。そのような場合、非干渉化前置補償器を多段階接続することが有効である<sup>[4]</sup>。非干渉化前置補償器の接続形態としては、直列接続、並列接続、またそれらの組み合わせとして直並列、並直列接続がある。本研究では、相互干渉をもたらす複数の振動成分を比較的簡単に軽減できる並列接続を用いる。

前置補償器の並列接続設計法は、複数の周波数  $\omega_0 i, i=1,2,\dots,n$  それぞれに対して  $n$  個の前置補償器  $G_{ci}$  を設計し、それら前置補償器を並列に接続する方法である。もう一つ的设计法としては、顕著な一つのハンチング周波数に対する前置補償器で対角優勢が達成できないとき、顕著な振動成分に対して新たに前置補償器を設計し、それを一つずつ並列に順次接続していく方法であるが、本研究では後者の方法を用いる。

1 段直列接続で軽減できなかった相互干渉の中で、その相互干渉が著しい一つの周波数  $\omega_0=11$  に着目して前置補償器  $G_{c2}$  を設計し、並列接続する。そのブロック線図を図 13 に示す。このときの逆ナイキスト線図とグリシュゴリン帯を図 14 に示す。

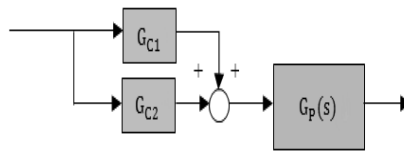


Fig.13 Block diagram of  $G_{c1}+G_{c2}$  parallel connection

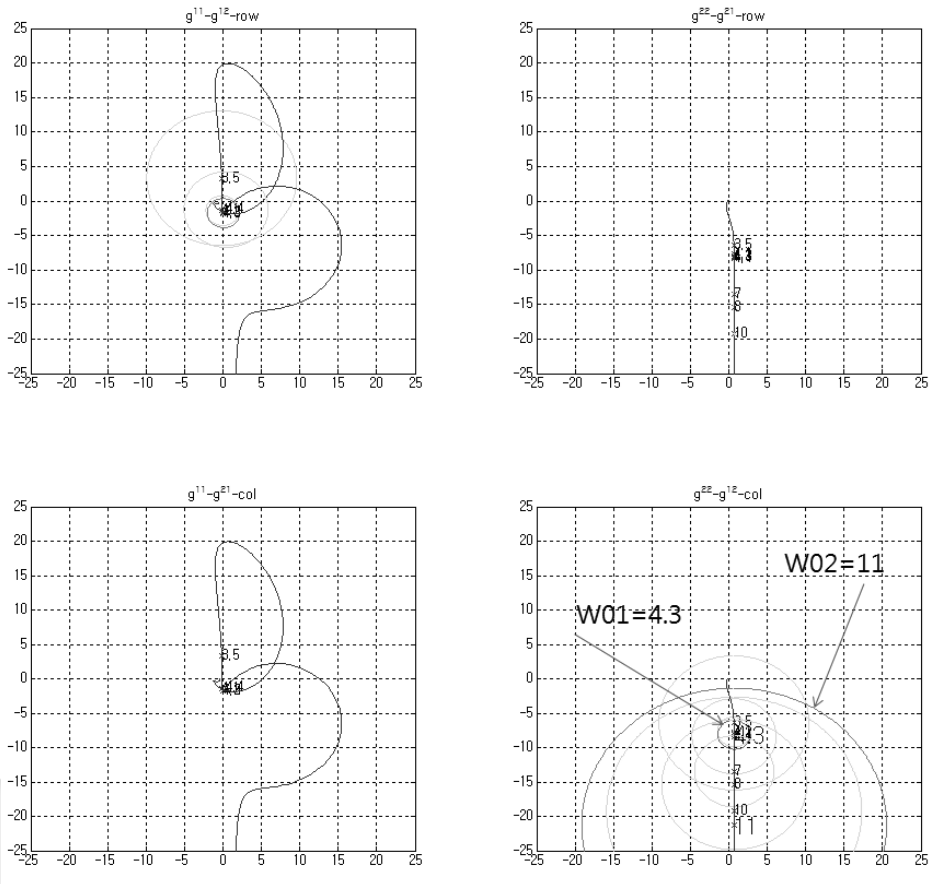


Fig.14 Inverse Nyquist array and Gershgorin band by  $G_{c1}+G_{c2}$

これより周波数  $w_{01}=4.3$  と  $w_{02}=11$  に対するゲリシュゴリン帯が原点を含まなくなり, また他の角周波数のゲリシュゴリン帯半径も小さくなる事が分かる. 更なる非干渉化を図るために,  $w_{03}=20.0, w_{04}=40.0, w_{05}=4.1, w_{06}=4.4, w_{07}=7.0$  に対する  $G_{c3}, G_{c4}, G_{c5}, G_{c6}, G_{c7}$  を設計し, 7段並列接続したときのブロック線図を図15に, 逆ナイキスト配列を図16に示す. このときの7段並列接続非干渉化前置補償器は, 式(7)のようになる. ゲリシュゴリン帯が原点を含んでいないことから, 一巡伝達関数行列  $G(s) = G_p(s) (G_{c1}+G_{c2}+G_{c3}+G_{c4}+G_{c5}+G_{c6}+G_{c7})$  の対角列優勢が達成されている.

$$G_c = G_{c1} + G_{c2} + G_{c3} + G_{c4} + G_{c5} + G_{c6} + G_{c7} = \begin{bmatrix} -0.1086 & 1.6104 \\ -1.4708 & 2.1950 \\ 6.8428 & 3.5541 \end{bmatrix} \quad (7)$$

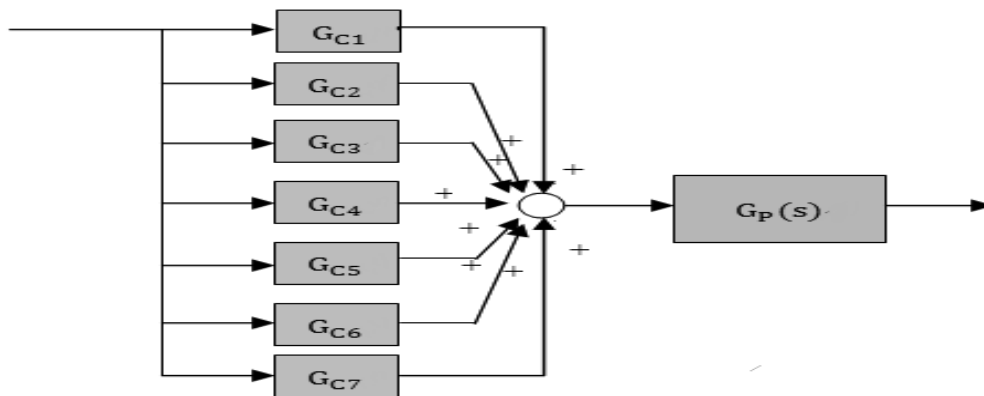


Fig.15 Block diagram of  $G_{c1}+G_{c2}+G_{c3}+G_{c4}+G_{c5}+G_{c6}+G_{c7}$  parallel connection

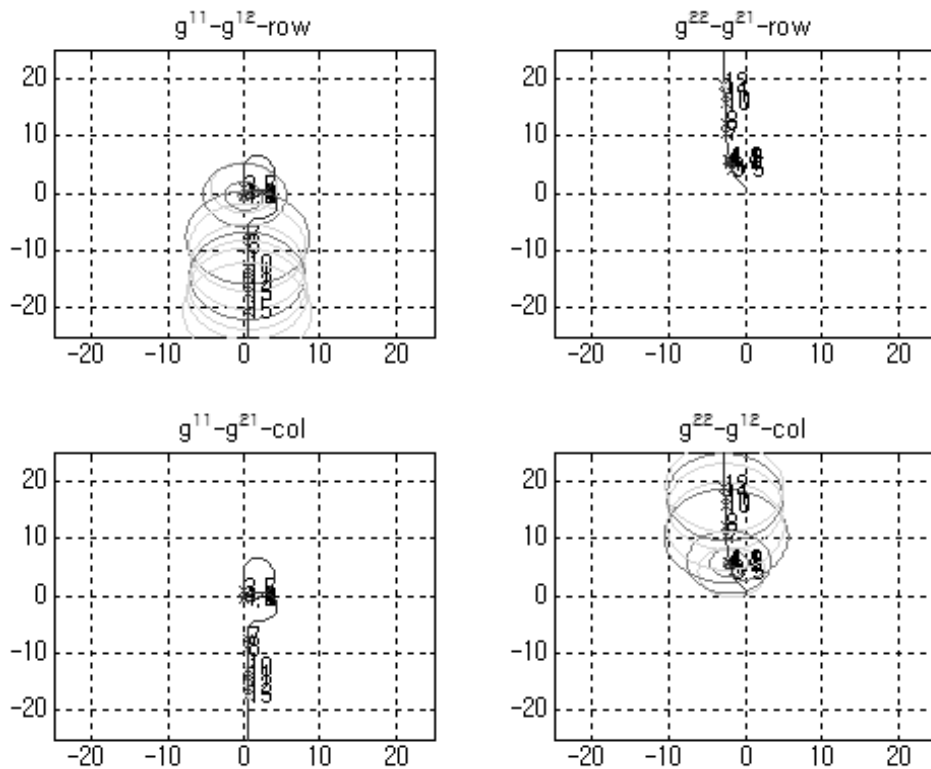


Fig.16 Inverse Nyquist Array and Gershgorin band by  $G_{c1}+ G_{c2}+ G_{c3}+ G_{c4}+ G_{c5}+ G_{c6}+ G_{c7}$



### 5. 非干渉化PID制御系の設計

#### 5.1 3入力2出力プラントに対する非干渉化PID制御

操作量を温水量と冷水量、及びタービン入口電磁弁、制御量をタービン入口圧力と出口圧力とし、制御目標をタービン入口圧力 1100 [KPa]、出口圧力 700[KPa] とする非干渉化制御系 PID を設計する (図 17)。

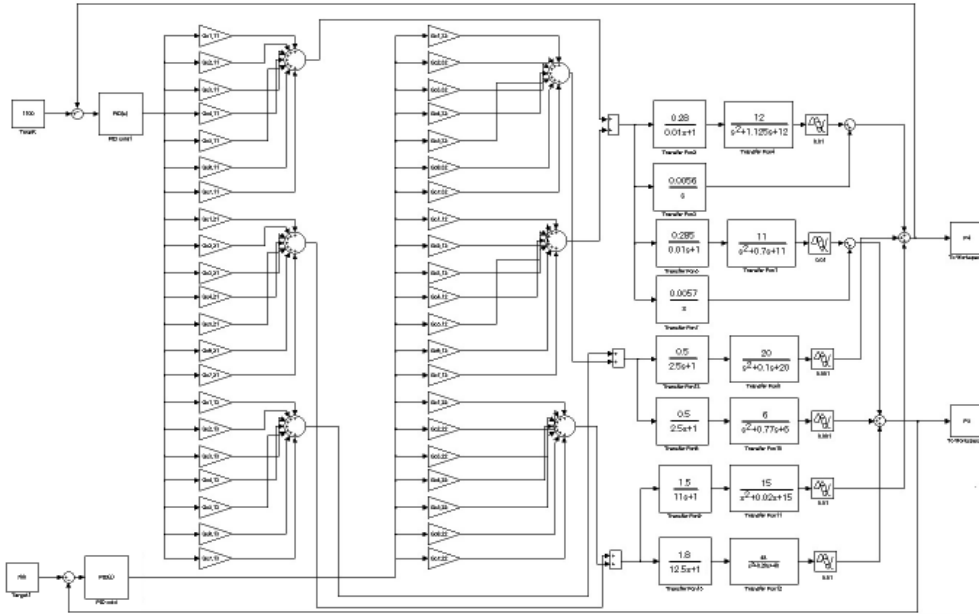


Fig.17 Block diagram of Decouple PID control system

3 入力 2 出力プラント  $G_p(s)$  に対して、限界感度法により設計された PID パラメータと制御結果を表 1 と図 18 に示す。

Table 1 温水ループと冷水ループの PID パラメータ

	温水ポンプ	冷水ポンプ
$K_p$	0.0434	0.6552
$T_i$	0.7036	0.4475
$T_d$	0.1759	0.1119

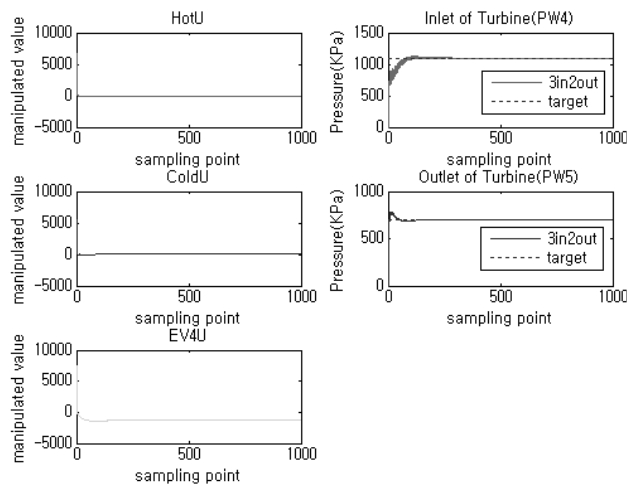


Fig.18 3inputs-2outputs Decouple PID Control by 7-stage parallel connection

### 5.2 2入力2出力プラントに対する非干渉化PID制御

ここでは操作量の数が制御性能に与える効果を検討するために, 前節より操作量の数が少ない温水量と冷水量の2つを操作量とする2入力2出力プラントに対する制御を試みる. 3入力2出力プラントと同様に, 7段並列接続前置補償器を設計し非干渉化PID制御を行った. 限界感度法により設計されたPIDパラメータを表2, 制御結果を図19に示す.

Table 2 温水ループと冷水ループのPIDパラメータ

	温水ポンプ	冷水ポンプ
$K_p$	0.0493	1.8347
$T_i$	0.1901	14.6086
$T_d$	0.0467	0.7950

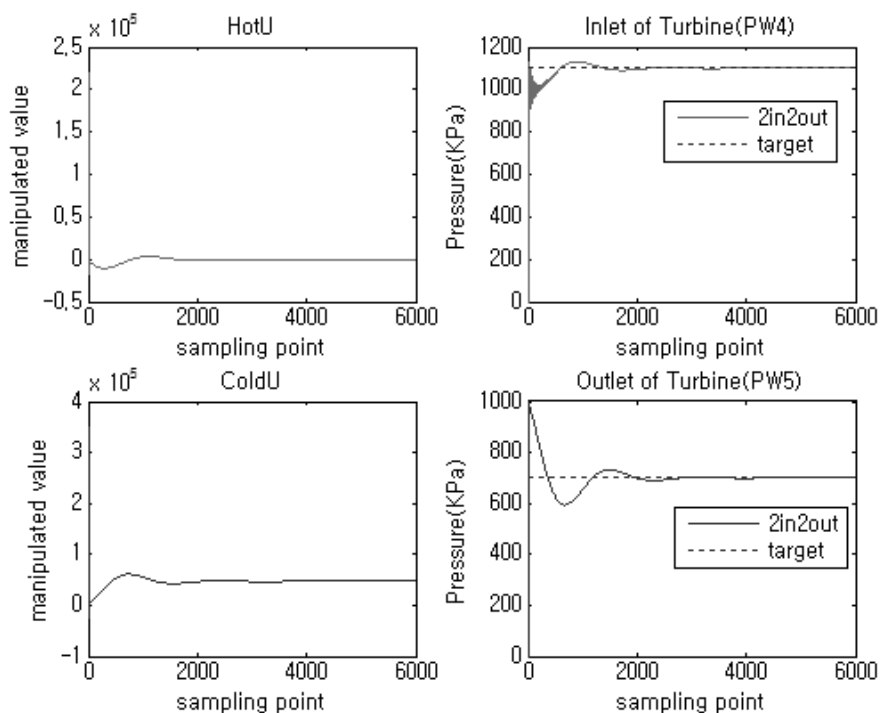


Fig.19 2inputs-2outputs Decouple PID control Result by 7-stage parallel connection

図18と図19より, 整定時間は各々約700秒と約2200秒である. この結果より, 操作量の一つ多い3入力2出力プラントに対する整定時間が約30%に短縮されることが分かる.

### 5.3 制御性能の検討

ここでは3入力2出力プラントと2入力2出力プラントに対する制御性能をゲイン余裕と位相余裕の観点から検討する. 図20は3入力2出力に対する温水ループのNyquist線図とBode線図を, また図21は冷水ループのそれらを表している. これらの結果より, 温水ループのゲイン余裕は $-180$  [°] 付近の $\omega=4.5$  [rad/sec] で $5.55$  [dB] であり, 冷水ループのゲイン余裕は $\omega=6.99$  [rad/sec] で $1.82$  [dB] である.

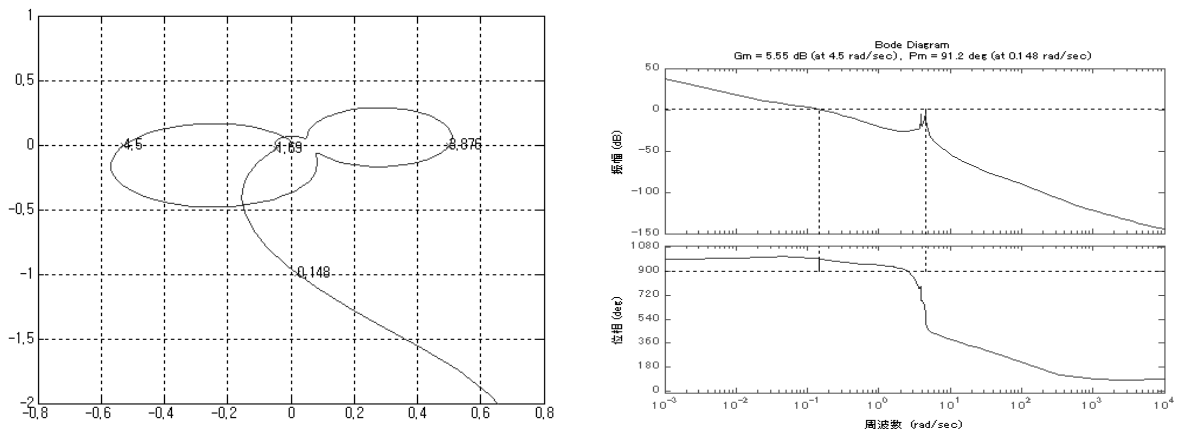


Fig.20. Nyquist and Bode diagram of Hot water loop of 3inputs-2outputs plant

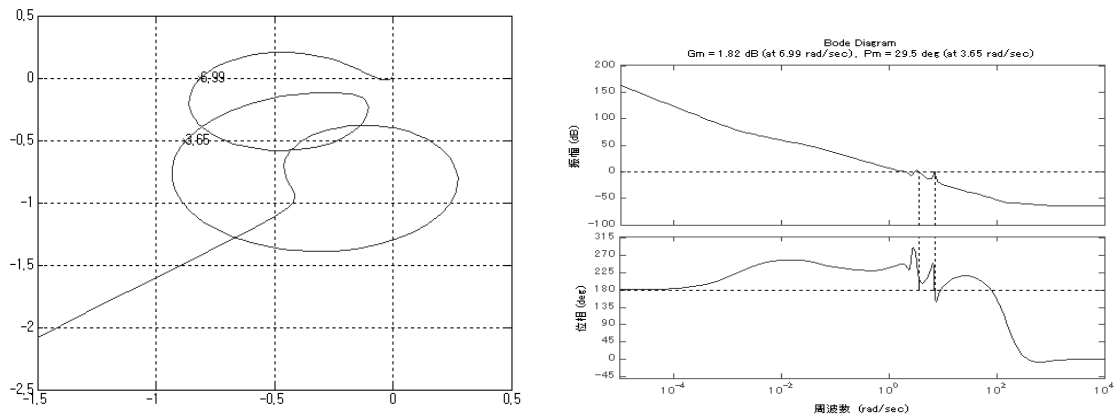


Fig.21 Nyquist and Bode diagram of Cold water loop of 3inputs-2outputs plant

Table 3 3入力2出力プラントと2入力2出力プラントの制御性能の比較

制御性能	望ましい値	区分	3入力2出力	2入力2出力
ゲイン余裕	3~10 [dB]	温水系	5.55[dB]	0.262[dB]
		冷水系	1.92[dB]	48.2[dB]
位相余裕	20~70[deg]	温水系	91.2[deg]	4.17[deg]
		冷水系	29.5[deg]	19.6[deg]
整定時間	・		700 秒	2200 秒

制御性能を比較したものが表3である。以上より、3入力2出力非干渉化PID制御系の方がゲイン余裕、位相余裕双方の望ましい値に近く、制御性能は高まることが確認できる。

## 6. 結 語

発電プラントの動作点近傍における動特性を十分に捉えた線形化伝達関数行列モデルを導出し、実データとの比較により、その妥当性を示した。また、操作量と制御量間の顕著な相互干渉を考慮した非干渉化PID制御系を設計し、非干渉化前置補償器による制御性能を示した。更に、操作量を増やす効果について検討し、その有効性を示した。

## 文 献

- (1) W.L.Owens, "OTEC plant response and control analysis", *ASME J Solar Energy Eng*, vol.104,no.3(1982), pp.208-215.
- (2) Satomi S, Han K-Y, S J-S, Lee H-H, "A learning control of unused energy power generation", *15th International Symposium on AROB*, vol.15,no.4(2010), pp.450-454.
- (3) H-H Lee, W-K Choi, J-Y Song, S-G Lee, Akizuki K, "Noninteracting PID Control of a Fluid Temperature and Liquid Level Interacting System", *Trans. IEE of Japan*, vol.119-C, no.8/9(1999), pp.1035-1041.
- (4) H-H Lee, Nagamachi M, W-K Choi, J-Y Song, Miyazaki M, Akizuki K, "Noninteracting Multi-Stage Noninteracting PID Control by Precompensators with Series-Parallel Connection", *Trans. IEE of Japan*, vol.123,no.1(2003), pp.43-49.