

汎用インバータを用いたPID制御の ゲインチューニングに関する実習教材の開発

千葉職業能力開発短期大学校 五十嵐 智彦

千葉職業能力開発短期大学校 栗秋 亮太

Development of Practical Training Materials on Gain Tuning
of PID Control Using A General-Purpose Inverter

IGARASHI Tomohiko, KURIAKI Ryota

要約 制御工学は、大学・高専を含め電気工学系の学校において幅広く教授されている。しかし、一般的な制御工学の授業は抽象的な議論に落ちいりやすく、また、実際の生産現場において必要とされる、PID ゲインのチューニングに関する技術が実習までを含めて教授されることは少ない。そこで筆者らは、職業訓練校・高専・大学の学生、および企業の新入社員等をはじめとする制御工学の初学者を対象とした制御工学に関する導入教材について検討した。本教材は、PID 制御の大意を感覚的に理解可能で、かつ PID ゲインの選定がシステムに与える影響を実践的・体感的に学習できるものである。本稿では、汎用インバータを使用した風速制御系を構成し、限界感度法、ステップ応答法などの実験的なゲイン選定法を採用した場合に、一般的なフィードバック制御の挙動を実習装置により容易に再現できたことから報告する。

I はじめに

第4次産業革命の進展に伴い、多くの設備のオートメーション化が急速に発展しており、制御工学に関する教育の重要性が増している。一般的な制御工学の講義は、伝達関数や状態方程式等の数学や物理をベースとした抽象的な議論に偏りやすく、学生からは不人気科目として認知されることが多い。また、制御工学の授業においては、授業の時限数の関係から、実際の生産現場等で必要とされるPIDゲインのチューニング技術について、十分に教授されないまま終わってしまう例も多い。特に、ポリテクカレッジをはじめとする技能・技術を重視する学校においては、PIDゲインのチューニング技術を授業に取り入れることは非常に重要なことであると考えられる。一方、生産現場では、PIDゲインの決定は、経験をベースに試行錯誤的になされることが多く、理論立ててPID制御を学習できる教材が求められている。しかし、モデルベースでゲイ

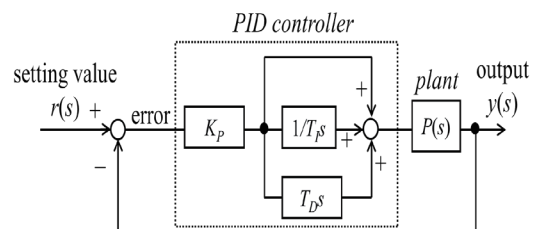


図1 標準的なPID制御系のブロック図

ンを設計する教材は数多く存在するものの⁽¹⁾、チューニングによるPIDゲインの決定に関する教材は、一般に多くはない。

そこで筆者らは、ファンと汎用インバータを用いて風速制御系を構成することで、訓練等で容易に実践可能なPID制御のゲインチューニング技術に関する教材について検討している。本稿では、筆者らが検討している実習装置にジグラーのステップ応答法、並びに限界感度法を適用した際に一般的なフィードバック制御の挙動を実習装置により再現可能かどうかの検討を行ったので報告する。

II ステップ応答法と限界感度法

図 1 に標準的な PID 制御系のブロック線図を示す。図のような制御系の実装にあたり、その PID 制御器のゲイン設計法として、大きく次の 2 つの方法が知られている。1 つは、極指定法やループ整形法、参照モデル法をはじめとするモデルベースで設計する方法であり、もう 1 つは、ステップ応答法や限界感度法などの制御対象の応答をもとに実験的にチューニングを行って決定していく方法である。本教材は、後者のチューニングによる決定の方法の習得について、対象としている。本教材で対象とするステップ応答法、並びに限界感度法についてその概略を示す。

1 ステップ応答法

はじめに、ステップ応答法の概略を示す。ステップ応答法は、制御対象が 1 次遅れ系であり、比例帯を狭くしても応答が振動的にならない場合に適用できる方法である。図 2 にむだ時間を含む正規化された一次遅れ系のステップ応答を示す。図中、 D はむだ時間、 T は系の時定数を表す。いま、制御対象 $P(s)$ が 1 次遅れ系で、そのステップ応答が図 2 に示すような形になった時、そのコントローラにおける PID ゲインは表 1 のように定めることができることが知られている。ここで、 K_P は比例ゲイン、 T_I は積分時間 [s] (ステップ状の偏差入力にて、積分要素のみで比例制御と同等の操作量を得るまでの時間)、 T_D は微分時間 [s] (ランプ状の偏差入力にて、微分要素のみで比例制御と同等の操作量を得るまでの時間) である。

上記方法によって、PID ゲインの大まかな目安を決めることができる。しかし、これらのやり方は、一般にゲインが大きめに算出されることが多く、実装後に微調整することが必要となることが多い。

2 限界感度法

次に限界感度法について示す。限界感度法とは、PID 制御をヒューリスティックにチューニングしていく方法である。このとき、限界感度法は、以下の手順で PID ゲインを決定していく。

① コントローラの積分ゲイン K_I と微分ゲイン K_D を 0 とし、比例要素のみが効くようにする。ただし、 K_I と K_D は以下の式で表される。

$$K_I = \frac{K_P}{T_I} \quad \dots \dots \text{式 (1)}$$

$$K_D = K_P T_D \quad \dots \dots \text{式 (2)}$$

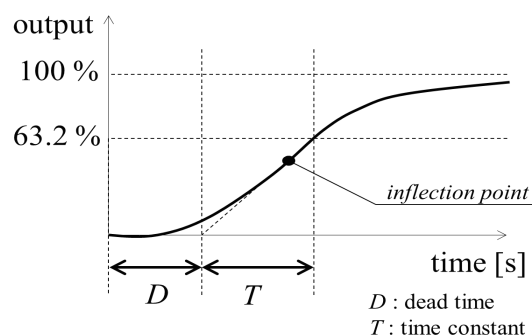


図2 1次系の標準的なステップ応答

表1 ステップ応答法による PID ゲイン選定⁽²⁾⁽³⁾

control	K_P	T_I	T_D
P	T/D	—	—
PI	$0.9 T/D$	$3.3 D$	—
PID	$1.2 T/D$	$2.0 D$	$0.5D$

表2 限界感度法による PID ゲイン選定⁽²⁾⁽³⁾

control	K_P	T_I	T_D
P	$0.5 k_{PC}$	—	—
PI	$0.45 k_{PC}$	$0.83 T_C$	—
PID	$0.6 k_{PC}$	$0.5 T_C$	$0.125 T_C$

② 比例ゲイン K_P を小さい方から大きい方に少しずつ変化させていき、出力が持続振動になる際の比例ゲイン k_{PC} を求める。また、振動周期 T_C を求める。

③ 表 2 の値から、最適な K_P 、 T_I 、 T_D を求める。なお、比例帯 PB は、次式から求められる。

$$PB = \frac{1}{K_P} \times 100 [\%] \quad \dots \dots \text{式 (3)}$$

④ ③の値をコントローラに設定し、微調整を行う。

この手法は、P 制御において、比例帯を狭くした時 (すなわち、比例ゲインを大きくした時) に永続的に振動しなければならないため、制御対象自体が 2 次遅れ系以上でなければ適用することができない特徴がある。

III 制御系の構成

本教材では、汎用インバータによりファンを駆動し、出力された風速をフィードバックすることによって、風速を一定に制御する制御系を構成した。その概略図を図 3 に、ブロック線図を図 4 に示す。また、実

際の教材を図5に、汎用インバータと周辺機器の接続図を図6に示す。本装置は、三菱電機製汎用インバータ FR-D720-0.4K (200 V、0.4 kW、以下、汎用インバータという)、昭和電機製直動式送風機 SB-100 (以下、ファンという)、発電機付きの模型風車 (以下、風車という) から構成される。風速目標値 (指令値) は、インバータの制御端子に可変抵抗を設け、電圧値で汎用インバータに入力する。当該汎用インバータの場合は、10番端子と5番端子間に予めDC5 V電圧が用意されており、この端子間に可変抵抗を接続し、可変抵抗によって生成される任意の電圧を2番端子に入力することで、インバータに目標値を設定できる。本システムにおける出力は風速であるが、風速を直接フィードバックすることは困難であるため、発電機付きの風車を設け、この出力電圧をフィードバック量として当該インバータの4番端子と5番端子間に与えている。偏差信号は、インバータ内部で演算され、PID演算を経て、出力周波数、電圧が決定される。当該インバータは、設定によりPID制御とすることができるので、汎用インバータをコントローラとして用いる。制御対象は電動機付きファンとする。汎用インバータの運転方法は、 V/f 制御とする。 V/f 制御では、電動機内の磁束の飽和を防ぐために出力電圧と出力周波数を一定に保つように制御している。したがって、出力周波数によって出力電圧は一意に決まるため、この制御系は1入力系と考えて差し支えない。また、汎用インバータにおいては、始動電流が過大となることを防ぐために、適切な加速時間 (および減速時間) を設定する必要がある。すなわち、指令値をステップ状に入力したとしても、その操作量は、設定した加速時間で変化することになる。これは、むだ時間と解釈することができる。むだ時間系はラプラス変換をすると無限級数に展開できることが知られているため、むだ時間を含む系は高次遅れ系であると考えられることができる。したがって、本教材で対象とする風速制御系には、限界感度法を適用することが可能である。一方、制御対象であるファンは、1次遅れ系に近似することができるので、ステップ応答法を適用することも可能である。

設定するパラメータの一覧を表3に示す。Pr.1は操作量である出力周波数の上限値であり、運転するファンの上限周波数 (60 Hz 若しくは 50 Hz) を設定する。Pr.128は、逆動作ないし正動作等の動作条件を決めるパラメータであり、本装置は正の偏差に対して正の操作量とするため、「逆動作」となるよう設定する。

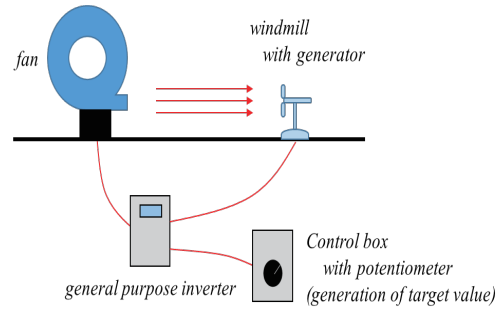


図3 汎用インバータによる風速制御系の構成

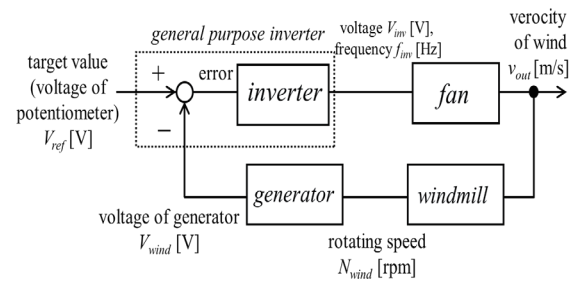


図4 風速制御系のブロック線図

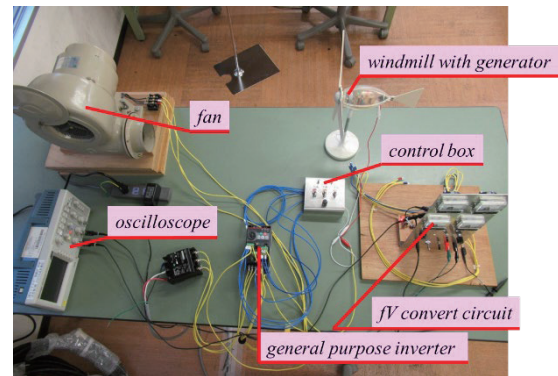


図5 教材の全体像

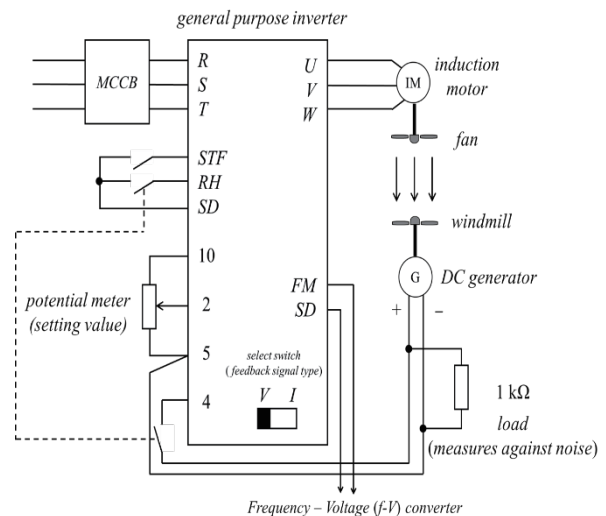


図6 インバータへの接続図

表3 インバータの設定パラメーター一覧

parameter	setting range	name (description)
Pr.1	60	maximum frequency (set maximum frequency of fan)
Pr.128	20	PID action selection (PID reverse action)
Pr.182	14	RH terminal function selection (RH terminal used as PID control valid terminal)
Pr.267	1	selection of voltage / current input (terminal 4 input 0 to 5V)

Pr.182 は、RH（高速運転指令）の端子の機能を変更するパラメーターであり、これを 14 と設定することで RH 端子を PID 制御有効端子へ変更することができる。Pr.267 は、端子 4 への入力信号の種類を選択するもので、本装置では DC 0-5 V の電圧信号をフィードバック量として読み取ることから 1 を設定する。

風速の指令値は、2・5・10 番端子に接続された可変抵抗によって生成する。風速のフィードバックは、風車に取り付けられた DC 発電機によって電圧変換し、4・5 番端子に入力する。このとき、汎用インバータの VI 切替用 DIP スイッチを V 側に切り換え 0-5 V の電圧入力ができるようにする必要がある（I 側は 4-20 mA の電流入力となる）。RH 端子は、表 3 に示すパラメーターの設定により PID 制御有効端子としているため、切替スイッチを接続し、スイッチが ON 時に PID 制御が有効になるようにしている。

IV ステップ応答法

汎用インバータを用いて、前節に示した風速制御系を構成した。ファンを起動したときの風車発電機の出力電圧を図 7 に示す。ただし、ファンの起動は、時刻 0.0 s（以下、全てのグラフについて同様）である。図 7 では、PID ゲインパラメータは初期設定値（比例帯：100%、積分時間：1.0 sec、微分時間：無効）を用いている。この場合、大きなオーバーシュートが発生しており、また定値に至るまでの変化も緩やかであることから、PID ゲインを適切に設定することによりオーバーシュートを抑え、素早く定値に至ることが可能であると考えられる。そこで、ステップ応答法を用いて、ゲイン設計をおこなっていく。

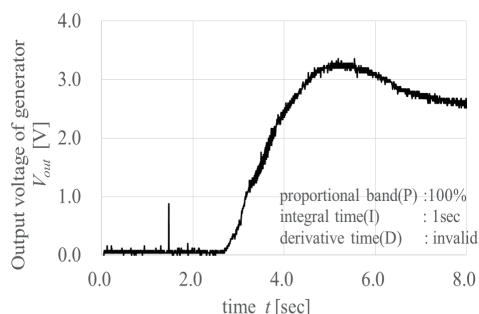


図7 PID 制御(初期設定値)

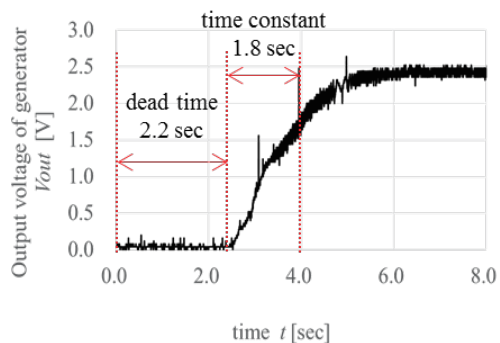


図8 風車出力のステップ応答

表4 ステップ応答法によるPID ゲイン選定

control	PB*	T_I	T_D
P	122 %	—	—
PI	136 %	7.3 sec	—
PID	102 %	4.4 sec	1.1 sec

*PB : Proportional Band

はじめに、ステップ応答を測定するため、フィードバック制御をかけずにファンを起動した際の発電機出力を確認する。図 8 にその様子を示す。図 8 より、むだ時間は 2.2 sec、時定数は 1.8 sec であると求められる。したがって、PID ゲインのパラメータを求めるため、表 1 の各値を計算すると表 4 のようになる。

表 4 の値を用い、P 制御、PI 制御、PID 制御のそれぞれについて、どのように制御特性が変わったかを確認する。図 9 には、P 制御の場合の風車発電機の出力を示す。比例帯の幅は表 4 にしたがって、122%とした。図 8 のステップ応答と比較すると、立ち上がりが急峻になり、目標値まで短時間で到達していることがわかる。また、PI 制御（パラメータは初期設定値）としたものと比較すると、オーバーシュートがなくなり、時定数も小さくなっていることがわかる。したがって、制御性は向上していることが確認できる。図 10 には PI 制御の場合の特性を示す。図 10 は同じ PI 制御で

ある図7と比較すると、オーバシュートがなくなっていることが確認できる。一方、時刻4.0s以降に、わずかではあるが右肩上がりに出力電圧が上昇している様子が確認できる。これは、積分操作によって定常偏差を打ち消しているためであると思われる。この特徴から、積分時間については徐々に短くしていくことで、適正な積分時間に行うことができると考えられる。最後に、図11のPID制御の場合を見てみる。図10に示したPI制御の場合と同様、4.0s以降に出力の上昇が見られることから積分時間の短縮が必要である。

これらのことから、ステップ応答法を適用ことによって、最適なPIDパラメータをチューニングする目安と方針を確立することができることが確認できた。

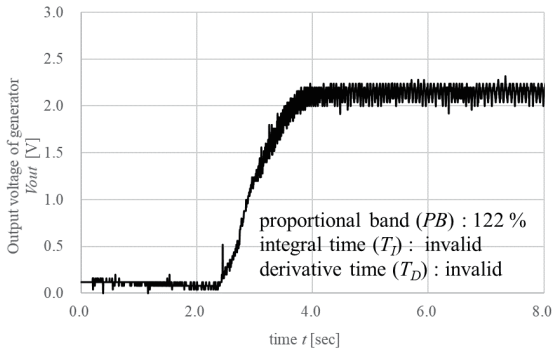


図9 P制御(ステップ応答法)

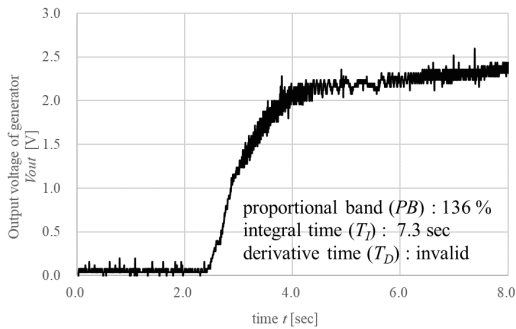


図10 PI制御(ステップ応答法)

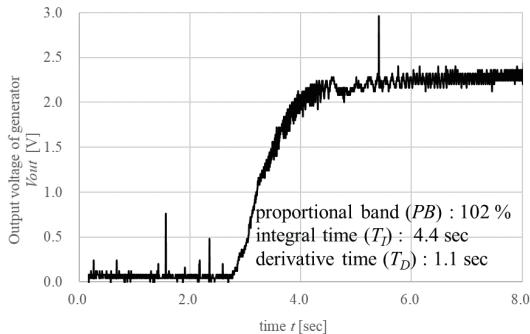


図11 PID制御(ステップ応答法)

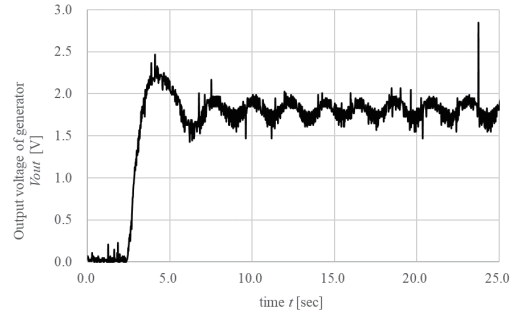


図12 P制御における持続振動(PB = 2.5%)

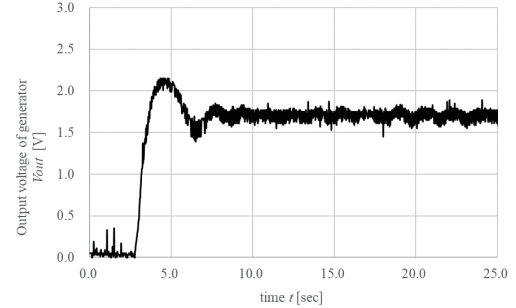


図13 P制御における持続振動の臨界値(PB = 10%)

V 限界感度法

次に、限界感度法によるゲインチューニングについて示す。

限界感度法を適用する際には、比例ゲインを大きくしたときにシステムが臨界的な振動（ハンチング）が発生する必要がある。よって、比例ゲインを大きく（すなわち、比例帯を狭く）した際に、システムが振動的になるかをはじめに確認する。本教材では、目標値が大きいときには振動的な応答が出にくくなる傾向があることから、ステップ応答法の場合と比較してやや小さめに設定した。図12に、積分制御と微分制御を無効とし、比例制御のみとしたときの風車の応答の例を挙げる。この図は、比例帯PBを2.5%として、運転したものである。このとき、オーバシュート以降、風車の風速が連続的に加減速を繰り返す、持続振動の状態になっていることが確認できる。よって、本システムは限界感度法が適用可能であることがわかる。

次に、比例帯を少しずつ広くしていきながら、持続振動が発生しなくなる臨界の比例帯値を決定する。本システムにおいては、比例帯PBを10%とした場合が、臨界的な振動が生じる限界値であった。この様子を図13に示す。また、同図より、振動周期 T_c は、おおむね1.0s、であることも確認できる。したがって、表2に示した k_{pc} を10.0、振動周期 T_c を1.0sとして限界感度法を適用し

表5 限界感度法によるPID ゲイン選定

control	$K_p(PB)$	T_I	T_D
P	5.0 (20%)	—	—
PI	4.5 (22%)	0.83 s	—
PID	6.0 (17%)	0.5 s	0.125 s

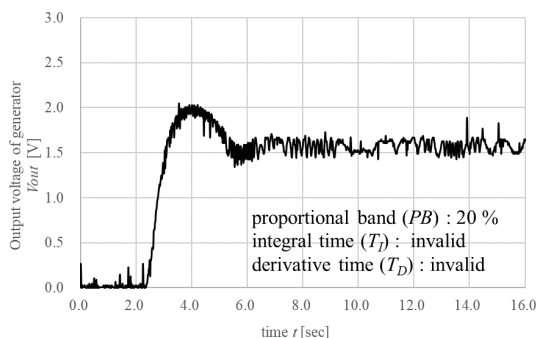


図14 限界感度法で決定したゲインによる制御(P 制御)

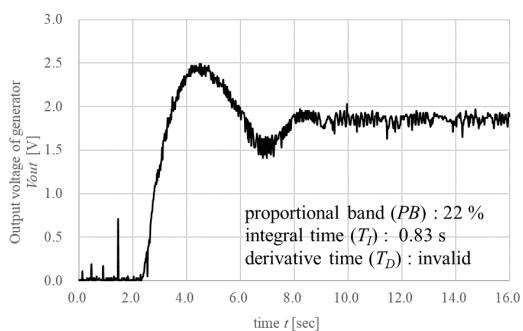


図15 限界感度法で決定したゲインによる制御 (PI 制御)

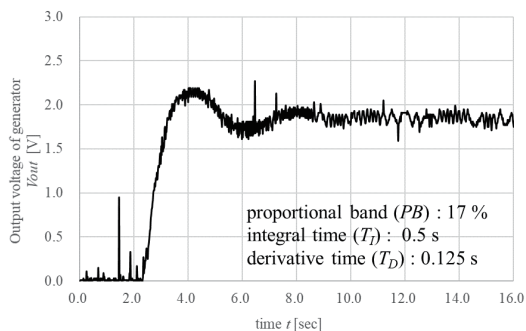


図16 限界感度法で決定したゲインによる制御 (PID 制御)

ていく。

表 2 をもとに、比例帯 PB 、積分時間 T_I 、微分時間 T_D を計算すると、表 5 のように求められる。この表の値を適用し、P 制御、PI 制御、PID 制御のそれぞれについて、どのように制御特性が変わったかを確認する。図 14 には、P 制御の場合の風車発電機の出力電圧

を示す。同図より、風車の出力電圧は一度オーバシュートが発生しているものの、速やかに一定値に収束している様子が確認できる。一般的に、限界感度法では、最大行き過ぎ量が 25% となるように設定されており、比例ゲインが大きめに求まることが知られている⁽²⁾。したがって、おおむね理論通りの応答が確認できたといえる。また、図 15 には PI 制御の場合を、図 16 には PID 制御の場合の風車の出力電圧をそれぞれ示す。P 制御の場合と同様にオーバシュートが発生しているが、PI 制御では積分要素が入りシステムの次数が上がったため、より振動的となっている様子が確認できる。PID 制御では、急激な変動に対応することが可能な微分要素が入ることから、オーバシュートが抑えられ、より短時間に一定値に収束している様子が確認できる。

実験結果から、おおむね理論通りの応答を実験装置により再現可能であり、さらに試行錯誤的なチューニングによって最適なゲイン調整に関する実習を本装置により行うことが可能であることが確認できた。

VI おわりに

本稿では、汎用インバータとファンを用いた、ステップ応答法と限界感度法による PID ゲイン設計に関する教材について検討した。実験結果から、一般的なフィードバック制御の挙動を実習装置により再現ができ、PID ゲインの設計手順を理論通りに適用することによって、システムの応答を自由に变化させられることが確認できた。したがって、PID ゲインチューニングに関する教材として活用できることが確認できた。今後は、システムのモデル化をとおし、理論的な PID ゲインの設計に関する授業への展開ができるよう、検討していく。

VII 謝辞

本稿の執筆にあたっては、本校電気エネルギー制御科 2 年生の大坪慧君、岡田昇也君、関根立実君にご協力いただきました。ここに礼申し上げます。

【参考文献】

- (1) 平田光男、Arduino と MATLAB で制御系設計をはじめよう！、Tech Share、2012。
- (2) 堀洋一、大西公平、制御工学の基礎、丸善、1997。
- (3) 須田信英、PID 制御、朝倉図書、1992。