

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

Development of Training Tool for Gain Tuning of PID Control with General Purpose Inverter

五十嵐 智彦 *1

IGARASHI Tomohiko

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、数学・物理をベースとした抽象的な議論に陥りやすく、プラントをはじめとする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含めて教授されることは少ない。筆者は、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ゲインのチューニングに関する教材について検討したので報告する。

1 はじめに

第 4 次産業革命進展に伴い、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、授業の制限数の関係から、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ンを設計する教材は数多く存在するものの、チューニングによる PID ゲインの決定に関する教材は、一般的であるとはいえる状況にない。

そこで筆者は、ジークラーの限界感度法、並びにステップ応答法による PID ゲインのチューニング技術を、ファンと汎用インバータによる風速制御系によって習得できるよう、教材開発を試みたので報告する。

2 限界感度法とステップ応答法

PID 制御におけるゲイン設計法としては、極指定法やループ成型法、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と、限界感度法やステップ応答法などの制御対象の応答をもとにチューニングを行って決定していく方法が存在する。本教材は、後者のチューニングによる決定の方法についての技術習得に供する教材である。本教材で対象とする限界感度法、並びにステップ応答法についてその概略を示す。

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 1 にむだ時間を含む標準的な一次遅れ系のステップ応答を示す。図中、 L 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。

上記方法によって、PID ゲインの適当な目安を決め

*1 電気エネルギー制御科

Department of Electrical and Energy Control

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と言われることが多く、実装後に微調整することが必要となることが多い。

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。図 2 に標準的な PID 制御系のブロック線図を示す。このとき、限界感度法は、次の手順で PID ゲインを決定していく。

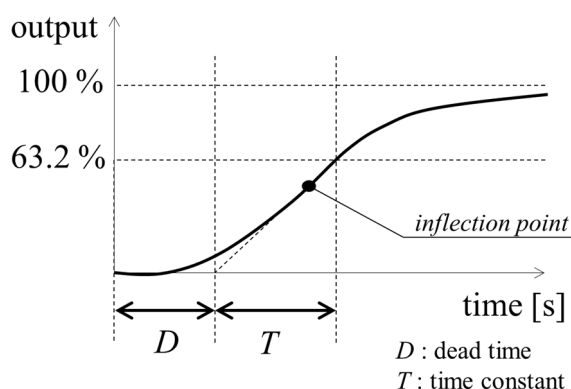


図 1 1 次系の標準的なステップ応答

表 1 ステップ応答法による PID ゲイン選定

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

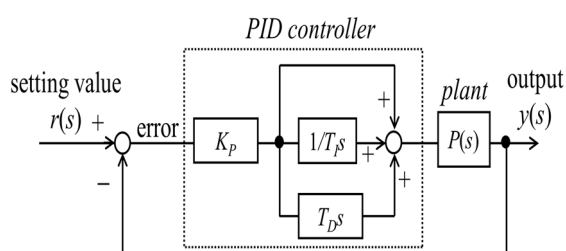


図 2 標準的な PID 制御系のブロック図

表 2 限界感度法による PID ゲイン選定

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

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。

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

$$K_D = K_P T_D \dots \text{式 (2)}$$

ここで、 T_I は積分時間[s] (ステップ入力にて、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。

② 比例ゲイン K_P 小さい方から大きい方に少しずつ変化させていき、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。 T_C を求めるのが困難な場合は、例えば 10 周期分の時間を求め、10 で割ることで、平均時間を求める。

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。

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

④③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。

3 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 (厳密には、風速を測定する風車の回転数) を一定に制御する制御系を構成した。その概略図を図 2 に、ブロック線図を図 3 に示す。また、実際の教材を図 4 に示す。インバータには、三菱電機製汎用インバータ FR-D720-0.4K (200V、0.4kW) を、ファンには、昭和電機製直動式送風機 SB-100 を使用した。当該インバータには、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。従って、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 入力系と考えると差し支えない。また、汎用インバータにおいては、過大な指導電流を防ぐために、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。従って、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。

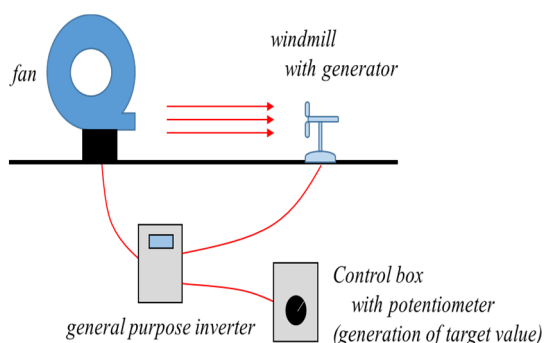


図 2 汎用インバータによる風速制御系の構成

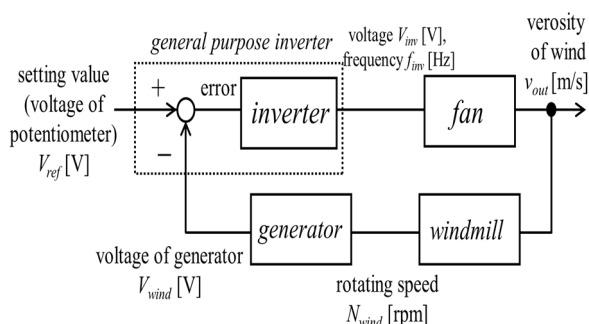


図 3 風速制御系のブロック線図

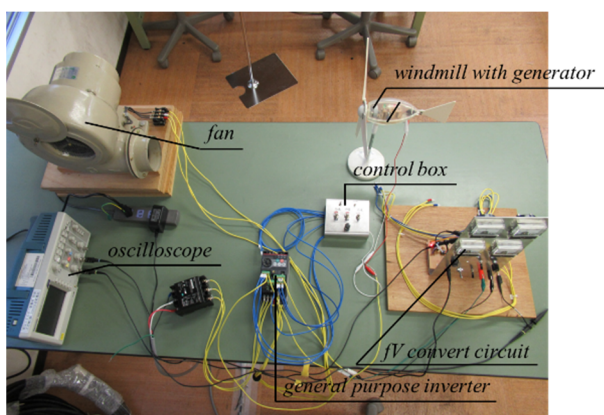


図 4 教材の全体像

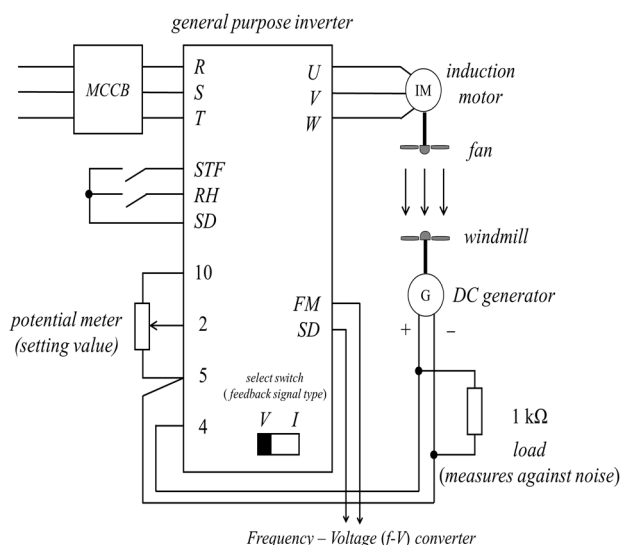


図 5 インバータへの接続図

表 3 インバータに設定するパラメーター一覧

parameter	setting range	name(description)
Pr.1	60	Maximum frequency (set maximum frequency offan)
Pr.128	20	PID actin selection (PID reverseaction)
Pr.182	14	RH terminal function selection (RH terminal usedas PID control valid terminal)
Pr.190	15	RUN terminal function selection (PID upperlimit)
Pr.267	1	selection of voltage/currentinput (terminal4input0to5V)

汎用インバータと周辺機器の接続図を図 5 に示す。また、設定するパラメーターの一覧を表 3 に示す。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 V/I 切替用 DIP スイッチを V 側に切り換え 0-5V の電圧入力ができるようにする必要がある (I 側は 4-20mA 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。

4 ステップ応答法

汎用インバータにおいて前節に示した風速制御系を構成し、ファンを起動したときの風車発電機の出力電圧を図6に示す。ただし、ファンの起動は、時刻0s(以下、全てのグラフについて同様)である。図6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:1.0sec、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いることから、更に制御性が向上するようなパラメータが存在しそうでである。そこで、ステップ応答法を用いて、よりよいパラメータをチューニングしていく。

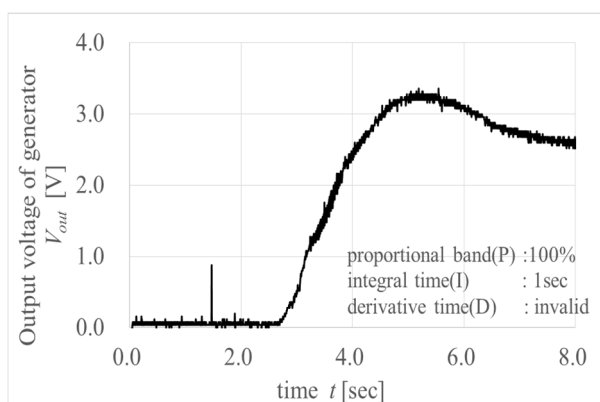


図6 PID制御(初期設定値)

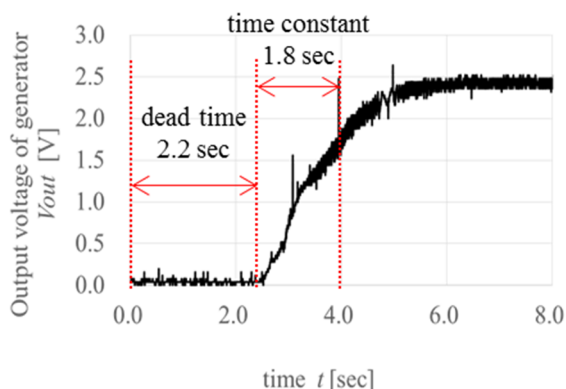


図7 風車出力のステップ応答

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%	7.3sec	—
PID	102%	4.4sec	1.1sec

*PB:Proportional Band

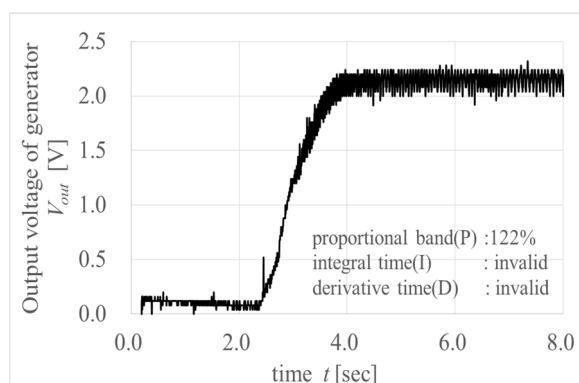


図8 P制御(ステップ応答法)

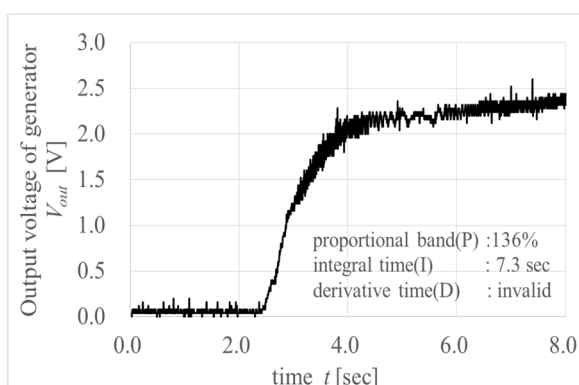


図9 PI制御(ステップ応答法)

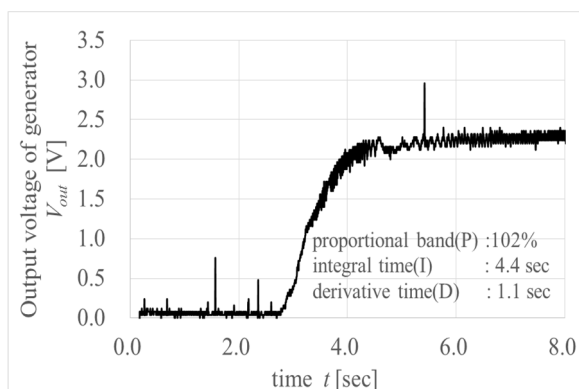


図10 PID制御(ステップ応答法)

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7にその様子を示す。図7より、むだ時間は2.2sec、時定数は1.8secであると求められる。従って、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3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8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に従い、122%とした。図7の無制御のものと比較すると、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分かる。また、PI制御（パラメータは初期設定値）としてものと比較すると、オーバシュートがなくなり、時定数も小さくなっていることが分かる。従って、制御性は向上していることが確認できる。図9にはPI制御の場合の特性を示す。図9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10のPID制御の場合を見てみる。同図は、図9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。

5 限界感度法

本教材における風速制御系では、比較的大きなむだ時間を含むこと、及び風速はファンの周波数の3乗に比例し非線形の関係があることなどから、高次遅れ系と考えることができる。従って、前節で試みたようにステップ応答法によりパラメータを定めることの他、限界感度法によってもチューニングを行うこともできると考えられる。従って、限界感度法によるチューニングを行っていく。

はじめに、積分要素、微分要素を無効にして、比例制御としたときの応答を確認していく。本来、風車発電機の実出力電圧を観測するのがよいと思われるが、本教材においては、インバータの周波数を観測したほうが、よりハンチングが確認しやすくなる。従って、本稿ではインバータの出力周波数をもってハンチングの発生を判定することとする。尚、この方法をもってハンチングの発生が不明瞭な場合には、ファンの発生する風切音によってもハンチングの有無とその周期を確認することが可能である。

図11から図13には、比例帯を徐々に狭くした場合の、ファン起動時のインバータ周波数の挙動を示す。なお、同図の周波数の測定は、インバータのFM出力信号をマイコン（dsPIC30F4012）により周波数—電圧

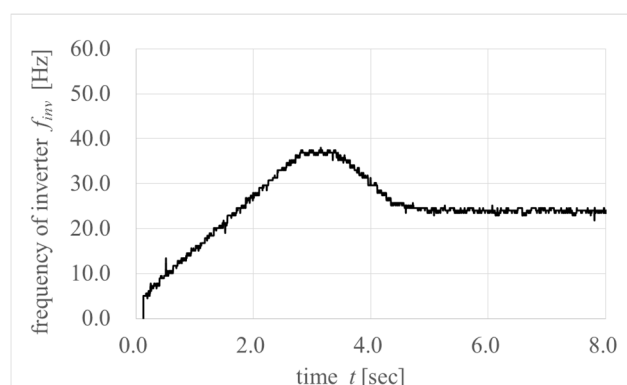


図11 P制御 (比例帯 100%)

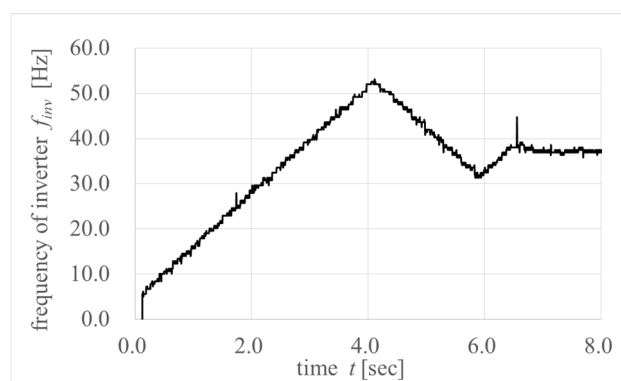


図12 P制御 (比例帯 30%)

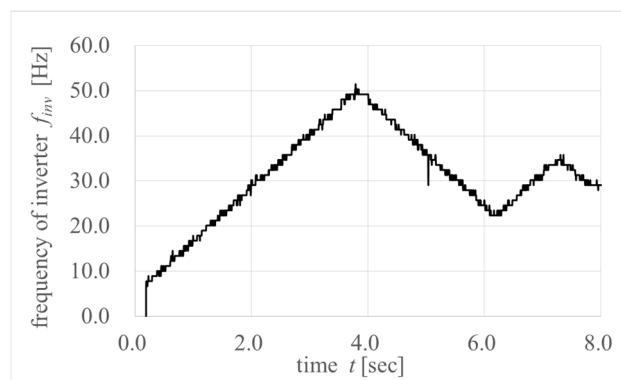


図13 P制御 (比例帯 15%)

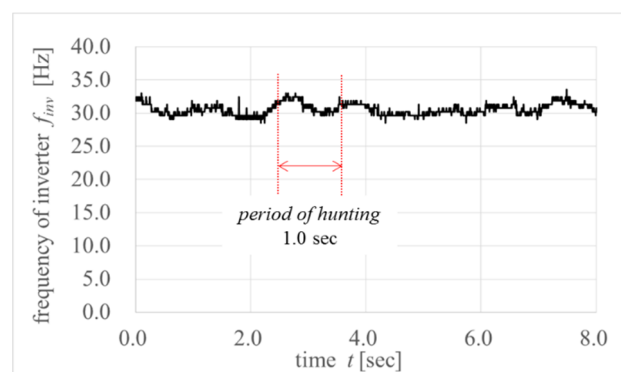


図14 P制御 (比例帯 15%、定常状態)

変換 (fV 変換) し、これを数値変換したものである。図 11 は比例帯を 100%としたものである。この場合は、比例帯が振動を起こすほど大きくないため、オーバシュートの後は一定の値に落ち着いている。図 12 には比例帯 30%としたものであるが、図 11 と比較するとやや振動的になっており、オーバシュートの後、小さなアンダシュートが確認できる。さらに、図 13 では、比例帯が 15%のものであるが、より振動的な挙動となっている様子が確認できる。図 13 の起動時から十分に時間が経過したときの挙動を図 14 に示す。この際、常時振動的な挙動を示している様子が確認でき、その周期は概ね 1.0s と読み取ることができる。従って、持続振動が発生する臨界値は 15%、その振動周期は 1.0s となる。この値から、表 2 の通りゲインを求めることができる。表 4 に PID パラメータの値を示す。

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 15 から図 17 に、表 4 の値によって PID 制御を行ったものを示す。図 15 は、P 制御の場合を示す。同図の応答を見ると、オーバシュートが発生しているが、その後は一定値に落ち着いている様子が確認できる。限界感度法では、オーバシュート量が 120%になる値が最適という考え方で設計を行うため、概ね理論通りの応答であると考えられる。ただし、風速制御系では、ファンが振動的な挙動となることを好まないため、更に比例帯を広めに設定する必要があると考えられる。図 16 は、PI 制御の場合である。図 16 の場合は、一定値に落ち着くまでに長時間を要していることから、更なる調整が必要であるが、オーバシュートが大きいことから、比例帯を広めに、積分時間を長めに調整する必要がある。図 17 は、PID 制御の場合である。図 17 の場合も図 16 と同様であるが、微分時間を短くしていくことで振動を抑制することができる。

よって、本教材では、限界感度法においても、ゲイン設計の方針を確認することができた。

6 まとめ

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。実験結果より、PID ゲイン設計の手順を実習装置により再現ができ、教材として活用できることが確認できた。一方、限界感度法においては、実験の正確さに課題があると思われるので、より精度の高い教材となるように引き続き検討していく。

表 4 限界感度法による PID ゲイン選定

control	PB	T_I	T_D
P	30%	—	—
PI	33%	0.83sec	—
PID	25%	0.5sec	0.125sec

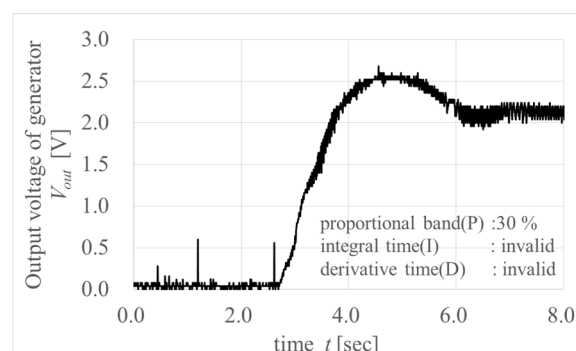


図 15 P 制御 (限界感度法)

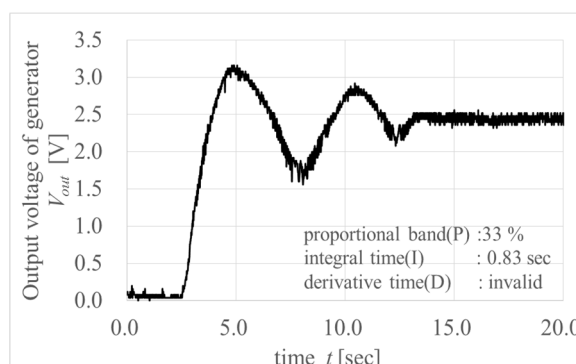


図 16 PI 制御 (限界感度法)

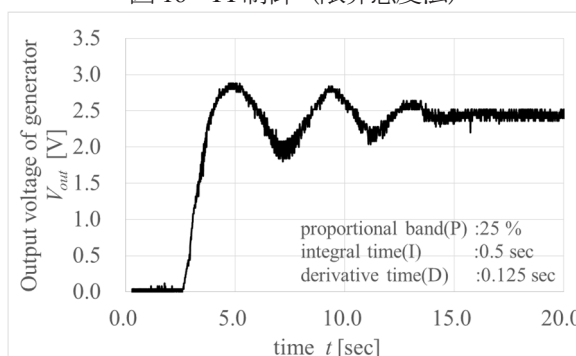


図 17 PID 制御 (限界感度法)

参考文献

- 1) 平田光男、「Arduino と MATLAB で制御系設計をはじめよう!」、TechShare、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