

# ILQ法を用いた小型風力発電機の制御システムの設計法

## Design Method for Small Wind Generator Using ILQ

○ 藤原諒\*, 天野耀鴻\*

○ Ryo Fujiwara\*, Yoko Amano\*

\* 日本大学

\*Nihon University

キーワード: 可変速小型風力発電機 (variable speed small wind generator), 最大出力制御システム (Maximum output control system), ILQ法 (ILQ method), PWM制御 (PWM control)

連絡先: 〒963-8642 日本大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻 制御工学研究室, 藤原諒  
Tel.: (024)956-8796, Fax.: (024)956-8796, E-mail: control\_lab\_303@yahoo.co.jp

### 1. 序論

近年, クリーンなエネルギーとして発電でき, 電力ネットワークの最小単位であるミニマル・クラスターの出力源として期待できる小型風力発電機の需要は高まってきている. しかしながら, 風力エネルギーは時間的変動が激しく, エネル

ギーを効率よく且つ安定的に利用することが重要な課題となる<sup>1,2)</sup>. そこで本研究では, エネルギーを効率よく且つ安定的に利用するためにILQ(Inverse Linear Quadratic)制御を用い最大出力制御システムを設計し, 更に実機実験を行い, 実験結果によって本研究の有効性, 実用性を検証する.

実システムで用いられる最適レギュレータは, システムに対してロバスト性を有している. しかし, 評価関数の重みが閉ループ応答などの工学的な仕様と明確に結びついていないのでその選定が本質的に難しく, それが実用上の難点となっている. そこで最適レギュレータ問題の結果を利用したILQ法が提案されている. ILQ法はある重みに関して最適フィードバックを求める制御手法であり, 希望する閉ループ応答を漸近的に実現する基準最適ゲインとフィードバックの最適性を保証する調整パラメータを用い最適フィードバックを求める制御手法である<sup>3)</sup>.

本研究では, 可変速小型風力発電機 (Aero-

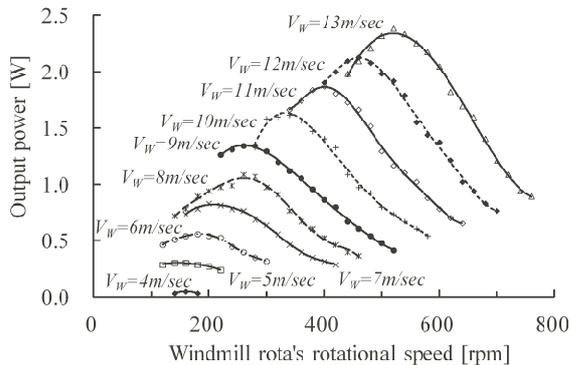


Fig. 1 Aerogen2におけるロータの回転速度と発電特性. Power generation characteristics vs. the rotational speed of the rotor in the Aerogen2.

gen2) を用いており、風速に応じて最大出力が得られる風車ロータの回転速度に着目し (Fig.1 参照), MOSFET デバイスを用いることにより Aerogen2 に負荷を掛け回転速度を調整する.

## 2. プラントモデル

制御対象の状態方程式は次式となる .

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y = Cx \quad (2)$$

Fig.2 の実験装置の等価回路に基づく状態方程式は次式となる.

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}(t) \\ \dot{i}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{J} & \frac{k_t}{J} \\ \frac{k_b}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega(t) \\ i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L} \end{bmatrix} V_i \quad (3)$$

ただし、係数行列  $A, B, C$  は次のようになる .

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -\frac{D}{J} & \frac{k_t}{J} \\ \frac{k_b}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L} \end{bmatrix}, \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

また、Table.1 に本研究で用いた各パラメータを示す .

## 3. 最大出力制御システム

Fig.3 に本研究で対象とする最大出力制御システムを示す . 初めに風速センサにより Aerogen2 の受風面の風速の測定を行う . 測定された風速は接続回路を介し、MATLAB 上に取り込む . MATLAB では風速を最適角速度と最適電流とし、ILQ 制御器に取り入れる . ILQ 制御器で生成された制御信号と三角波を比較演算子より PWM 信号を生成する . PWM 信号は MOSFET デバイスを流れる発電電流を制御し、Aerogen2

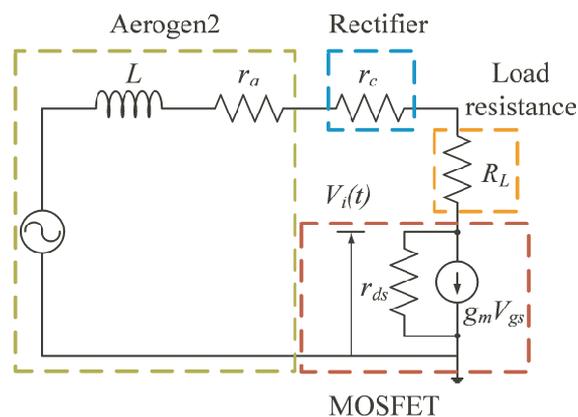


Fig. 2 実験装置の等価回路 . The equivalent circuit in the experimental equipment.

Table 1 本研究のパラメータ . Parameters of this study.

Aerogen2	
Armature resistance $r_a$	12.5
inductance $L$	0.53 H
Moment of inertia $J$	0.008891 kg · m <sup>2</sup>
Back electromotive force $k_b$	0.003802 V/(rad/sec)
Torque constant $k_t$	124.5443 N · m/A
Viscous friction coefficient $D$	0.007017 kg · m/sec
MOSFET	
Transconductance $g_m$	14 S
Voltage between gate sauce $V_{gs}$	30 V
Drain resistance $r_{ds}$	0.13
Others	
Rectifier $r_c$	133
Load resistance $R_L$	10.8

の発電電流を変化させる . この様に Aerogen2 に掛ける負荷を変更させることで発電ブレーキを掛け、風車ロータの回転速度を調整する . また、PWM 信号を MOSFET デバイスに伝送することで MOSFET デバイスの発熱損失を大きく低減することができ、風速に応じる最大発電量を追従する応答速度が速い特長がある<sup>4)</sup> .

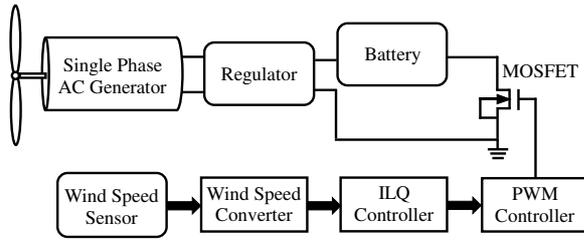


Fig. 3 最大出力制御システム . Maximum output control system.

#### 4. ILQ 法の設計

ILQ 法を設計するに当たり,

- 1) 可制御・可観測
- 2) 系は原点に零点を持たない
- 3) 最小位相系
- 4) 状態フィードバックによる非干渉化が可能である

以上の条件を満たす必要がある<sup>5)</sup> .

##### 4.1 可制御・可観測

式 (3) の各係数行列より可制御ランクは

$$\begin{aligned} \text{rank} \begin{bmatrix} B & AB \end{bmatrix} &= \text{rank} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{k_t}{JL} \\ -\frac{1}{L} & \frac{R}{L^2} \end{bmatrix} \\ &= 2 \end{aligned} \quad (5)$$

式 (3) の各係数行列より可観測ランクは

$$\text{rank} \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{D}{J} & \frac{k_t}{J} \end{bmatrix} = 2 \quad (6)$$

となり, 可制御・可観測となる .

##### 4.2 系は原点に零点を持たない

式 (3) の各係数行列より

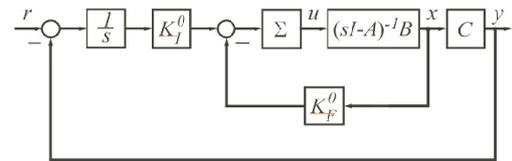


Fig. 4 ILQ 最適システム . The ILQ optimal system.

$$\begin{aligned} \text{rank} \begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix} &= \text{rank} \begin{bmatrix} -\frac{D}{J} & \frac{k_t}{J} & 0 \\ \frac{k_b}{L} & -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &= 3 \end{aligned} \quad (7)$$

となり, フルランクとなることから原点に零点を持たないことはわかる .

##### 4.3 最小位相系

安定なシステム且つ不安定な零点を持たない系である最小位相系は次式から求められる .

$$\begin{aligned} \Gamma(z) &= \begin{bmatrix} zI - A & -B \\ C & 0 \end{bmatrix} \\ &< \text{rank}[A] + \text{rank}[B] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{rank}[\Gamma(z)] &= \text{rank} \begin{bmatrix} z + \frac{D}{J} & \frac{k_t}{J} & 0 \\ \frac{k_b}{L} & z + \frac{R}{L} & \frac{1}{L} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &= 3 \end{aligned} \quad (9)$$

となり, 最小位相系であることが確認できる .

##### 4.4 状態フィードバックによる非干渉化が可能である

ILQ 法は多入出力制御系であり, 目標値の変化が内部で複雑に干渉し, 思い通りの出力値が得られない . そこで干渉させない手法として非干渉化行列  $D$  を用いる . 式 (10) の相対次数  $d_i$  を求め, 次式の非干渉化行列  $D$  を求める .

$$D = \begin{bmatrix} c_1 A^{d_i-1} B \end{bmatrix} = CAB \quad (10)$$



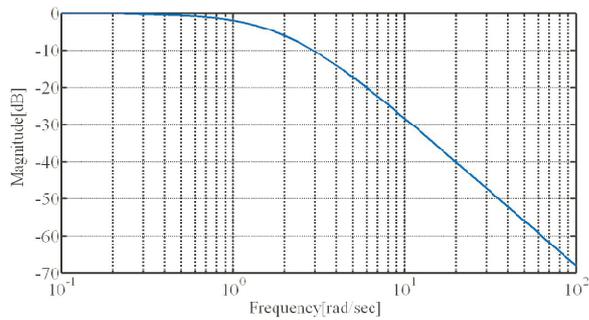


Fig. 7 ILQ法における周波数特性 .Frequency characteristic in the ILQ method.

いてILQ Controller 入力し , Wind Power Generator で PWM 信号を D/A 変換し出力している . Power Supply は接続回路に電圧供給している . また , Fig.6 は ILQ Controller となる .

Fig.7 は ILQ 法における目標値から出力値の周波数応答である . 低周波領域では , 目標値に高い感度を有しているが , 高周波領域になるほど目標値の感度は低くなる .

## 5. シミュレーション結果

Fig.8 は時定数  $T=0.5$  時の操作量を示したものである .  $\sigma$  を大きくするほど操作量も大きくなる傾向がある .

また , Fig.9 は時定数  $T=0.5$  時の制御量を示したものである . 時定数  $T=0.5$  とすることで 2 次遅れの応答波形に漸近し , 調整パラメータ  $\sigma=600$  と  $\sigma$  を大きくすることで目標値の整定時間が早くなることがわかる . Fig.9 での 2 次遅れの応答波形に漸近するが操作量が大きくなることから , 操作量と制御量間には兼ね合いが重要となる .

## 6. 実機実験結果

### 6.1 応答性の比較

Fig.10 は ILQ 法と文献 4) で提案されている PID 制御の応答性との比較結果である . PID 制

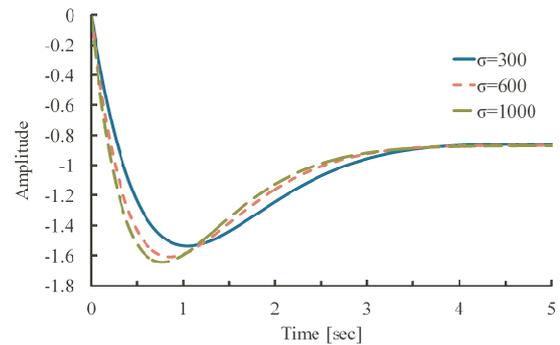


Fig. 8  $\sigma$  可変時のステップ応答 (操作量) . The step response of  $\sigma$  variable (actuating variable).

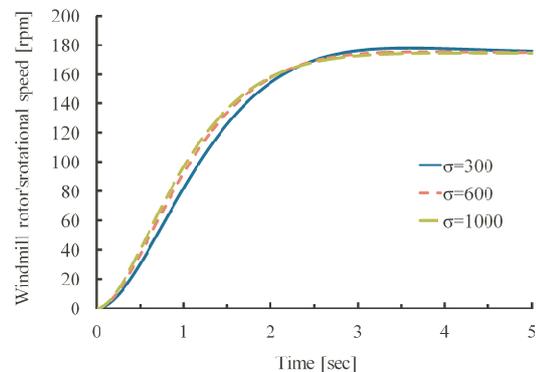


Fig. 9  $\sigma$  可変時のステップ応答 (制御量) . The step response of  $\sigma$  variable (controlled condition).

御では  $P = 7.4$  ,  $I = -0.04$  ,  $D = 7.2$  と実機実験により値の選定を行い , ILQ 法では ,  $\sigma = 600$  ,  $T = 0.5$  とシミュレーション結果より定めている . また , Aerogen2 の受風面に  $6[\text{m/sec}]$  の風速を当て出力値を最適回転速度となる約  $173[\text{rpm}]$  としている . 整定時間を見てみると ILQ 法は ,  $7.04[\text{sec}]$  で収束しているが , PID 制御は一定となることなく多少の乱れが生じた . このことから ILQ 法は PID 制御に比べ良好であることが確認できた . また , シミュレーション結果ほど安定した結果は得られてはいないが . 乱れることなく安定していることが確認できる .

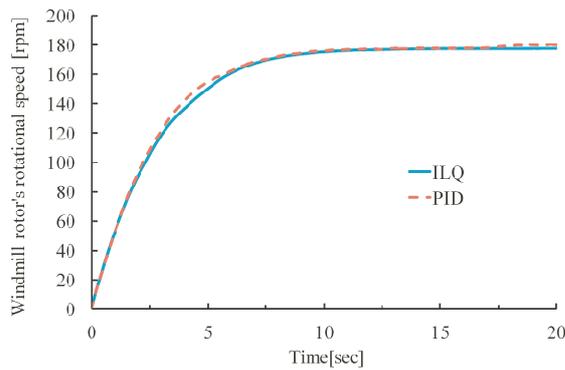


Fig. 10 ILQ 法と PID 制御の応答の比較 .  
Comparison of the response of the ILQ method  
and PID control.

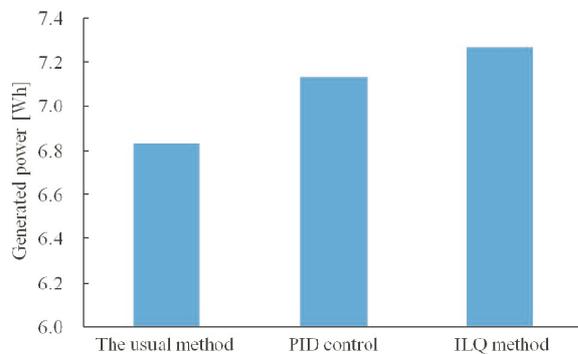


Fig. 11 風速 6[m/sec] に対する発電特性 .  
The measurement of generate characteristic for  
wind speeds 6[m/sec].

## 6.2 発電量比較

Fig.11 は風速 6[m/sec] に対する 1 時間の発電電力特性であり、左から従来の方法 (風車軸に単相交流発電機を直接つなぎ、単相交流発電機で発生した交流電力を整流器に通し直流電力に変換、バッテリーに蓄電する方法である)、PID 制御、ILQ 法である。従来の方法の発電電力 6.8303[Wh]、PID 制御の発電電力 7.1338[Wh]、ILQ 法の発電電力 7.2687[Wh] となった。このことから、従来の方法に比べ PID 制御は約 1.04 倍、ILQ 法は約 1.06 倍となった。この結果より、ILQ 法は PID 制御に比べ回転速度の変動をより抑えられ、最適回転速度を追従していた。

## 7. おわりに

本研究では、ILQ 法を用いた小型風力発電機の最大出力制御システムを提案した。最大発電量を得るために Aerogen2 の風車特性を活かし、最大発電量の得られる最適回転速度を ILQ 法を用い追従させた。従来の方法や PID 制御を用いた方法と実機実験で比較することで ILQ 法の有効性と安定的な電力が得られることが確認できる。また、PID 制御は最適回転速度と実測の回転速度の偏差をとるためタコメータと風速センサを有していたが、本研究の ILQ 法では風速センサのみで実現した。

今後は、長時間測定を行い発電電力の標準偏差の比較を行い、更なる ILQ 法の検証を予定をしている。最終的には MATLAB などを DSP などのチップに組み込みよりコストダウンを図る必要がある。

## 参考文献

- 1) 松本吉彦, 柳父悟:新世代に向けた電力システム構造のビジョン, 電学論 B, 123-12, 1456/1441(2003)
- 2) 森本茂雄, 武田洋次, 中村智彦:永久磁石同期発電機を用いた可変速風力発電システムのセンサレス出力最大化制御, 電学論 B, 123-12, 1573/1579(2003)
- 3) 木村英紀, 藤井隆雄, 森武弘:ロバスト制御 現代制御シリーズ 8, コロナ社, 109/156(1994)
- 4) 天野耀鴻, 梶原宏之:可変速小型風力発電機の最大出力制御システム, 電学論 B, 127-4, 559/565(2007)
- 5) 藤井隆雄, 下村卓:ILQ 最適サーボ系設計法の一般化, システム制御情報学会論文誌, 1-6, 194/203(1988)
- 6) 天野耀鴻, 高見弘, 藤井隆雄:同期リラクタンス電動機の ILQ ロバスト電流制御系の設計法, 電学論 C, 132-3, 401/408(2012)
- 7) 関義郎:ILQ 設計理論を応用したエレベータの振動抑制制御, システム制御情報学会論文誌, 42-11, 599/606(1998)