

2. ピッチ制御の問題点と改良

自然風が定格風速を越える時、発電機は定格回転数を越えることになるため、ピッチ制御により風力エネルギーを逃がすことで、安定した発電出力を得ることができる。この時の発電機の回転数とトルクを **図-3** に示す。

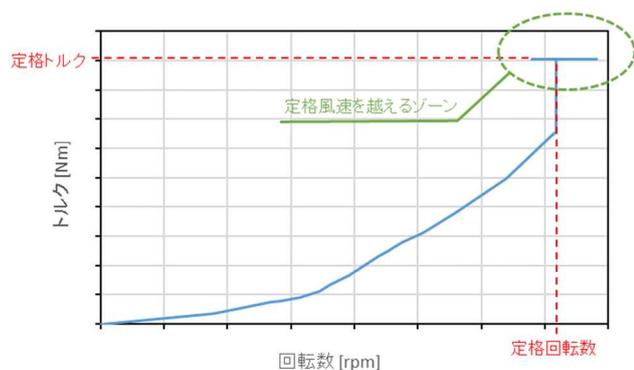


図-3 発電機の回転数とトルクの関係

発電機のトルクは一定なので、発電機出力を安定化させるには回転数を安定させればよいが、回転数を制御する手法としてピッチ制御とトルク制御を実装している。ピッチ制御は次節2.1で説明し、ここではトルク制御について説明する。発電機トルクは発電機の回転に負荷をかけるが、回転数が上がる場合は負荷を大きくすることで回転速度を抑え、回転数が下がる場合は逆に負荷を軽くして回転速度の減少を緩和する手法である。トルク制御は電氣的動作なので反応速度が速いが、大きな効果は得られないため、ピッチ制御の補助的役割として機能している。

2.1 ピッチ制御の問題点

ピッチ制御とは、発電機の回転数と現在のピッチ角を入力パラメータとし、定格回転数を維持するためにPI制御を用いて目標ピッチ角を計算し、ブレードのピッチ角を制御するものである (**図-4 従来のピッチ制御**)。

ここでPI制御とは制御工学用語で、現在の測定値と目標値を使って、できるだけ素早く目標値に到達する制御システムのことである。PIはP: Proportional (比例), I: Integral (積分)の頭文字であり、測定回転数とピッチ角から比例計算と積分計算を使用して目標ピッチ角を計算している。しかし、この目標ピッチ角に実際に到達するまでに機械的なタイムラグが存在する。つまり計算により求めたピッチ角にブレードを動かすために必要な時間が考慮されていないため、目標のピッチ角に到達したときには既に新たな目標ピッチ角が計算で得られることになる。そこでPI制御で求められたピッチ角に機械的に到

達する遅れ時間後のピッチ角を計算し、ピッチ角予測値として制御に採用することとした (**図-4 全体**)。

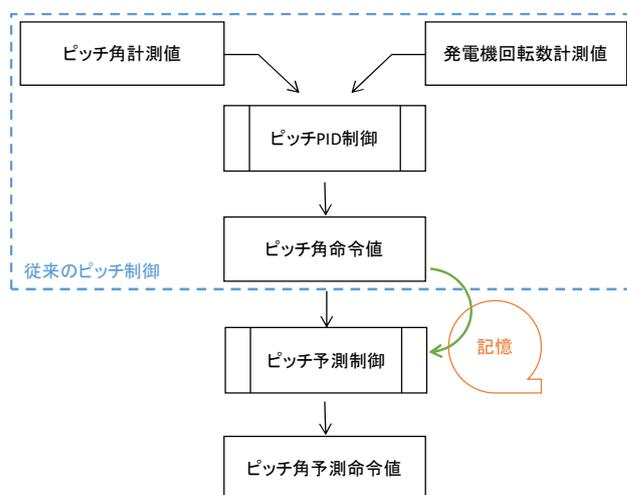


図-4 ピッチ制御の流れ

2.2 ピッチ制御の改良

ピッチ制御に予測制御の手法を使用した開発が既に検討されている^{2,3)}。そこでピッチ制御により求められた目標ピッチ角を収集・解析することにより、目標ピッチ角予測関数を導出する手法を検討する。予測関数により、現在時間から τ 秒後の目標ピッチ角を予測することができる (**図-5**)。 T_i を現在時間、 P_i を現在の目標ピッチ角とし、目標ピッチ角予測関数より、 τ 秒後の目標ピッチ角 P_τ を計算する。

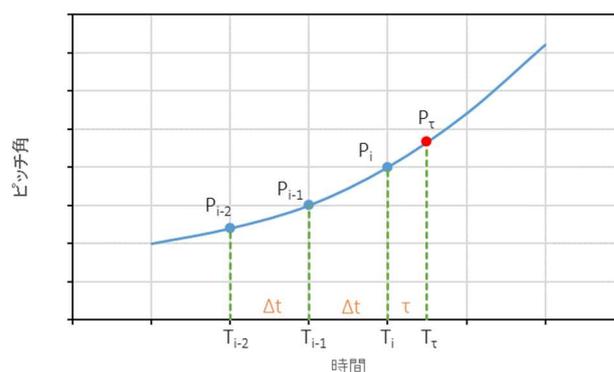


図-5 ピッチ予測制御関数

3. ピッチ制御の改良による動作検証

ピッチ制御の改良による効果を検証するため、当社富津工場で運転している1号機風車の制御プログラムを改造し、動作試験を行った。

3.1 試験ケースと結果

試験では予測時間 ($\tau=0.2$ 秒, $\tau=0.3$ 秒, $\tau=0.5$ 秒, $\tau=0.8$ 秒) を入力パラメータとし, 予測時間を持たない従来のピッチ制御 ($\tau=0$ 秒) も併せて動作試験を実施した. 試験ケース 1~ケース 9 までの試験条件と結果の一覧を表-1 に示す. 従来のピッチ制御と新ピッチを比較すると, ピッチ角の偏差には大きな差はないが, 回転数の偏差は 10rpm 程度減少する傾向である. 平均では回転数の偏差は 48rpm から 39rpm になっている.

表-1 試験結果一覧

| | 予測時間 τ (sec) | case | 平均風速 (m/s) | 回転数 (rpm) | | ピッチ角 (度) | |
|----------|----------------------|------|---------------|-----------|--------|----------|-------|
| | | | | 平均 | 偏差 | 平均 | 偏差 |
| 従来のピッチ制御 | - | 1 | 11.3 | 1817.4 | 52.802 | 5.4 | 2.391 |
| | | 2 | 11.7 | 1815.8 | 48.596 | 6.0 | 2.650 |
| | | 3 | 10.4 | 1824.6 | 42.201 | 3.9 | 2.277 |
| | 平均 | | | | 47.866 | | 2.439 |
| 新ピッチ制御 | 0.2 | 4 | 10.9 | 1825.4 | 37.472 | 4.7 | 2.904 |
| | 0.3 | 5 | 11.2 | 1826.4 | 42.662 | 5.6 | 2.217 |
| | 0.5 | 6 | 11.7 | 1825.3 | 41.638 | 6.1 | 2.812 |
| | | 7 | 10.5 | 1822.6 | 39.932 | 4.0 | 2.718 |
| | 0.8 | 8 | 11.7 | 1825.8 | 39.528 | 6.1 | 3.223 |
| | | 9 | 10.3 | 1827.7 | 33.360 | 3.5 | 2.530 |
| | 平均 | | | | 39.099 | | 2.734 |

図-6 にピッチ角と回転数の時間変化の例 (case2) を示す. ピッチ角は回転数を基にピッチ要求角を計算しているので, 両者の変動には若干のずれがあることが分かる.

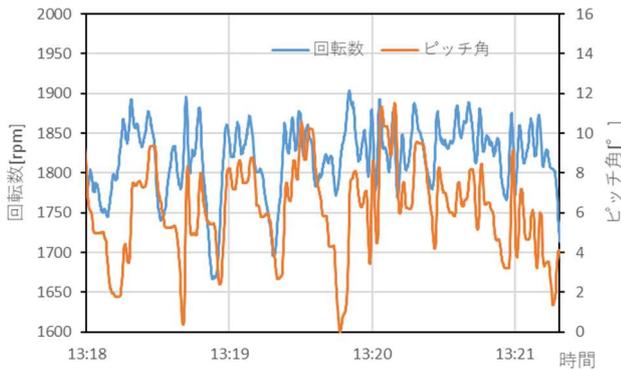
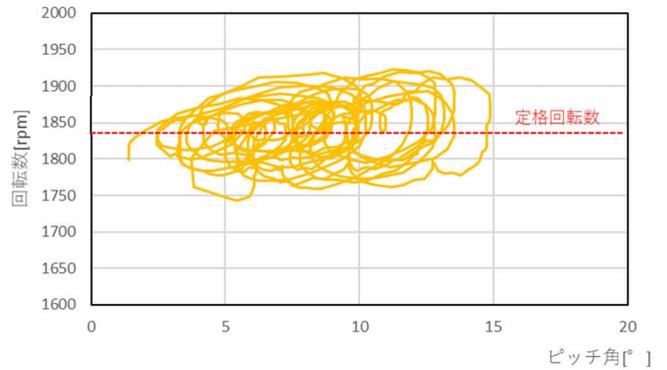


図-6 回転数とピッチ角の時系列図 (case 2)

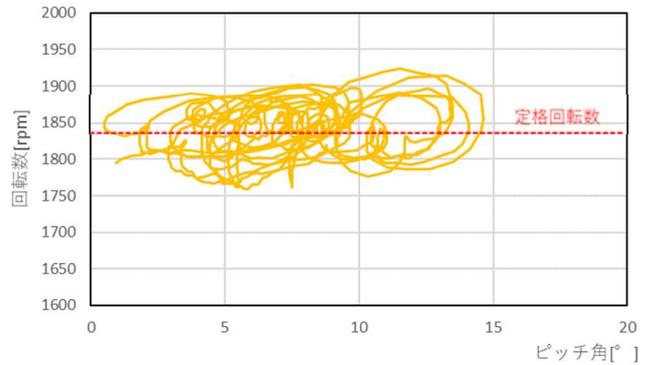
図-7 に試験結果の一部を示す. 各グラフは縦軸に発電機回転数, 横軸に計測したピッチ角を示している. 結ばれた曲線は同時刻のピッチ角と回転数の履歴を表している.

試験はナセル上平均風速 12m/s 前後の条件で実施した. $\tau=0.2$ 秒, $\tau=0.3$ 秒のデータが十分に取得できなかったためここでは示していない. 従来のピッチ制御と比較して, ピッチの動きが広がってピッチ角 15° まで動いてお

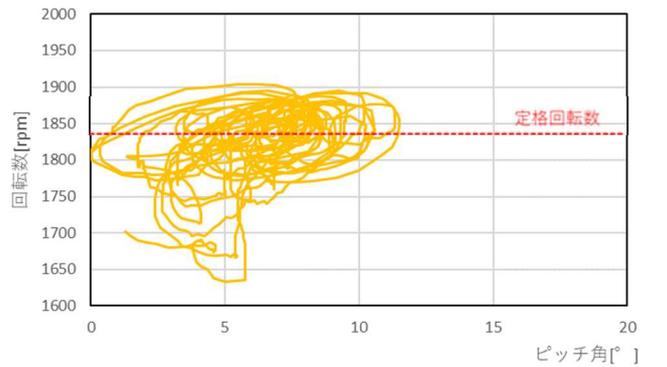
り, また, 従来のピッチ制御でみられるピッチ角 5° 付近の一時的な回転数低下の傾向が改善されている.



a) ピッチ制御試験 case6 ($\tau=0.5$ 秒)



b) ピッチ制御試験 case8 ($\tau=0.8$ 秒)



c) 従来のピッチ制御 case2 ($\tau=0$ 秒)

図-7 発電機回転数とピッチ角の履歴図

3.2 相互相関係数による評価

さらに今回検討するピッチ制御の効果を確認するために, 旧ピッチ制御の試験 2 ケース (case1, case2), および新ピッチ制御 ($\tau=0.8$ 秒) の試験 2 ケース (case8, case9) を使用して, 相互相関係数による比較を試みた. 図-8 に比較に使用した旧ピッチ制御の case1 と新ピッチ制御の case9 の回転数とピッチ角の履歴図を示す.

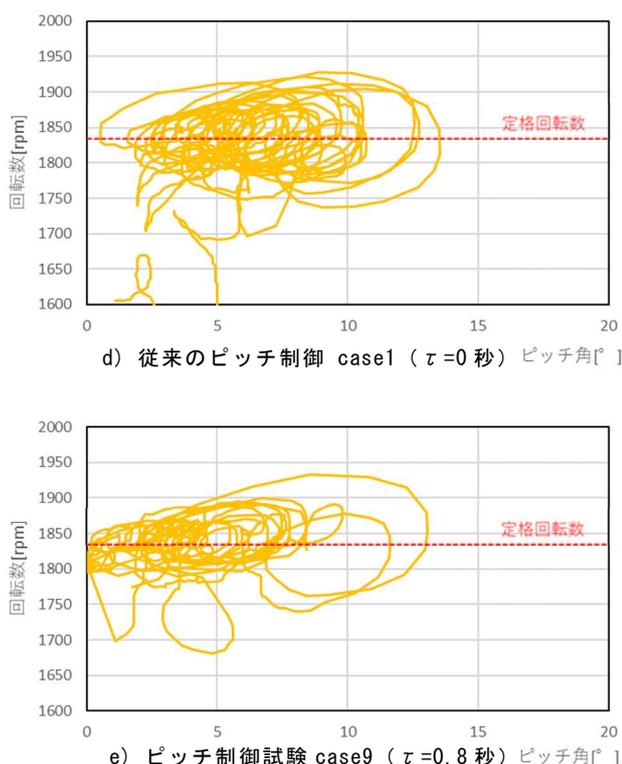


図-8 発電機回転数とピッチ角の履歴図（追加）

図-7 b), c), 図-8 d), e)で示したデータを使用し、これらの異なった風況条件で試験結果を比較するために、回転数と計測ピッチ角の相互相関係数を時間をずらして計算した。相互相関係数 C_{xy} 計算式を下記に示す。

$$C_{xy} = \sigma_{R\alpha} / (\sigma_R \cdot \sigma_\alpha)$$

ここに

$$\sigma_{R\alpha,j} = (1/n) \sum_{j=0}^n (R_i - R_m) \cdot (\alpha_{i+j} - \alpha_m)$$

j は時間ずらしのための添字

σ_R : 回転数の標準偏差

σ_α : ピッチ角の標準偏差

R_i, R_m : i 番目の回転数データと平均値

α_i, α_m : i 番目の計測ピッチ角データと平均値

となる。

図-9 に各試験ケースの相互相関係数の比較を示す。回転数とピッチ角の相関が最大の場合は相互相関係数は 1.0 になるが、今回の最大値は 0.436 であった。新ピッチ制御と従来のピッチ制御を比較すると、約 1 秒の遅れ時間までの相関係数が新ピッチシステムでは大きくなっており、約 4% 増加している。また、相関が最大となるピークの位置も 0.3 秒程度早くなっている。

1 秒以後の相互相関係数の特性は、個々のデータの変

化特性に影響を受けて差が出ているものと推察している。この結果から、予測ピッチ角による制御は回転数の変化に対して 1 秒までのピッチ角の応答性を改善していることが分かる。

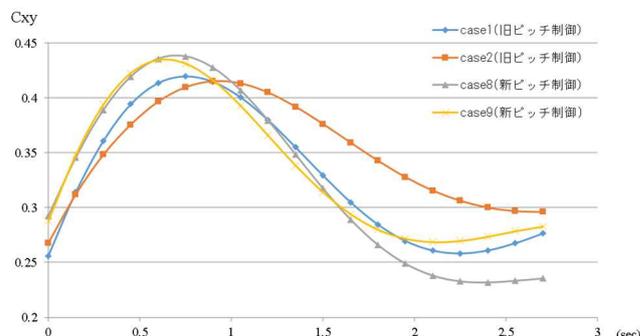


図-9 回転数とピッチ角の相互相関係数

4. あとがき

ピッチ制御に使用されている PI 制御は、メカニカルな動きを要求するシステムにおいては標準的な手法と言えるが、常に変動する自然風の影響下では、目標とするピッチ角が常に変動するため、目標ピッチ角へ移動するのに必要な動作時間自体が誤差となり、それが発電機定格運転の安定性に影響しているものと考えられる。

今回のピッチ制御の改良を総合的（回転数の標準偏差および相互相関係数など）に判断すると、新ピッチ制御は従来の制御と比較して、その性能を改善する効果が期待できる。また、今回の改良は従来のピッチ制御に機能を追加しただけの改良であり、従来のピッチ制御に対して今回の改良が悪影響を及ぼしていないことが確認できた。

5. 今後の研究課題と開発

今回得られた試験データは平均 12m/s 前後の風速域での試験であったが、さらに高風速域での動作検証を行う予定である。そして十分な検証結果が得られた後は、他の風車にもこのピッチ制御システムを導入し、設定場所による差異がないかを検証したいと考える。

参考文献

- 1) 牛山 泉：風車工学入門（第 2 版），森北出版，平成 14 年 8 月
- 2) 藤田穰，中村恵子，鈴木俊太郎：モデル予測制御の機械制御への適用，IHI 技報 Vol.51 No.2，2011 年 6 月
- 3) 橋爪悟：Predictive Functional Control の実用化手法の開発および社内適用展開，住友化学技報，2015 年 7 月