レーザトルクセンサを用いた発電プラントの性能診断技術*

黒田 英彦^{*1}, 梅沢 修一^{*2}Diagnostic Technology of Performance of Power Plants Using
Laser Torque SensorHidehiko KURODA^{*3} and Shuichi UMEZAWA^{*3} Toshiba Corporation Power Systems Company,
8 Shinsugita-cho, Isogo-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 235-8523 Japan

More than 70% of electricity in the world is supplied by thermal power plants, which use fuels such as oil, coal and liquefied natural gas. In recent years, combined cycle power plants fill the leading role of thermal power plants. It is important to evaluate the efficiency of turbines in combined cycle power plants, so that it leads fuel conservation and reduction of carbon dioxide emissions. Heat input-output analysis is often used to evaluate turbine efficiency. But the accuracy of analysis is approximately 10%, because it is difficult to measure high temperature fluid parameters such as flow rate and temperature. Therefore, we are developing a high accurate non-contact torque measurement system, which is comprised of He-Ne laser sensors, thin metal reflectors and the correlation method for calculating turbine torque by sensor output signals. We confirmed that torque measurement accuracy is approximately 1% in field tests for steam turbine power plants. Further, we carried out field tests in a combined cycle power plant. As a result, this torque measurement system is expected to be useful for a high accurate torque measurement in power plants.

Key Words: Thermal Power Plant, Combined Cycle Power Plant, Turbine, Torque Measurement, Laser, Correlation Method

1. 緒 言

現在, 世界の電力供給量の 70%以上は, 石油, 石炭, 液化天然ガス等の化石燃料を用いる火力発電より供給されている. 火力発電では, 化石燃料の効率的な利用が求められ, ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた高効率な発電方式であるコンバインドサイクル発電が注目を浴びている.

このため, コンバインドサイクルプラントの性能診断は, 非常に重要であり, また, 化石燃料の効率的な利用は, 炭酸ガスの排出削減にもつながる.

従来, タービンの性能診断は, 入出熱法による解析で行われていた. しかし, 入出熱法では, 解析に必要な高温流体の流量および温度の正確な把握が困難であり, 10%程度の誤差があると言われている.

そこで, 従来よりも高精度な性能診断手法の確立を目的として, レーザを用い, タービン単体の出力トルクを誤差 1%で直接測定する高精度なトルク計測技術の開発を進めている^{1)~3)}. ここでは, 本技術のトルク測定性能について報告する.

2. トルクの測定原理

本手法では, レーザを用い, 図1に示すように運転中のタービンと発電機との間で出力トルクに比例して発生する軸ねじれ: θ [rad]を非接触で測定し, 式(1)からタービンの出力トルク: F [Nm]を求める.

$$F = \kappa \cdot \theta \quad (1)$$

κ : タービンと発電機とのねじり剛性[Nm/rad]

そこで, 出力伝達軸のタービン側と発電機側にレーザ光を反射する反射板を各々取り付け, 連続発振のレーザ光を集光照射して反射光を検出する. そして, タービン側と発電機側の検出信号との間の位相差を相関法によって演算し, 高精度かつロバストに軸ねじれを求める.

Fig. 1 Configuration of laser torque sensor

* 原稿受付 2008年6月4日.

^{*1} 正員, (株)東芝(☎235-8523 横浜市磯子区新杉田町8).

^{*2} 正員, 東京電力(株)(☎230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1).

E-mail: hidehiko.kuroda@toshiba.co.jp

3. 信号処理手法

本開発では、出力伝達軸のタービン側と発電機側に図2に示す反射板を取り付け、反射板上におけるレーザ光の直径が約 $5\mu\text{m}$ となるように集光照射する。レーザは、波長 632.8nm 、横モード TEM_{00} のHe-Neレーザである。そして、その反射光を検出すると、タービン側および発電機側において、図3に示す検出信号を回転毎に得ることができる。図中に示される遅れ時間が、タービン側と発電機側の検出信号との間の位相差である。レーザの直径が約 $5\mu\text{m}$ と微小であるため、検出信号は、立上りおよび立下りが急峻なパルス列で構成され、例えば、タービン側と発電機側の先頭パルス間の時間差が精度良く測定できれば、遅れ時間を高精度に求めることができる。

しかし、立上りが急峻なパルスであるため、ノイズ波形との識別が困難であり、またパルスの立上りにノイズが重畳すると立上り時間の測定誤差が大きくなる。さらに、パルスの振幅変動も測定誤差の原因となる。

そこで、本開発では、相関法を用い、式(2)に示す相関関数： $\phi(\tau)$ を計算する。タービン側と発電機側の検出信号が同一であることから、 $\phi(\tau)$ が最大となる場合の時間： τ [s]が遅れ時間： τ_d [s]となり、また、図3に示す検出信号を用いて計算するため、 $\phi(\tau)$ は、デルタ関数のような鋭いピークを有する関数となり、高精度かつロバストに遅れ時間： τ_d [s]を求めることができる。

$$\phi(\tau) = \frac{1}{\delta} \sum_{t=C}^{t=C+\delta} G_t(t) \cdot G_g(t+\tau) \quad (2)$$

δ : 検出信号の時間幅[s]

C : 検出信号の開始時間[s]

$G_t(t)$: タービン側の検出信号

$G_g(t)$: 発電機側の検出信号

そして、遅れ時間： τ_d [s]を用い、式(3)により軸ねじれ： θ [rad]を求めることができる。

$$\theta = 2\pi \cdot \frac{\tau_d}{T} \quad (3)$$

T : タービンの回転周期[s]

4. 性能の検証試験

回転試験装置を用い、トルク計測装置の測定精度を実験室内で試験検証した。回転試験装置は、200kW モータ駆動の回転軸に対してダイナモメータによって負荷ト

ルクを加え、回転軸に軸ねじれを発生させる装置である。回転軸の駆動側および負荷側に反射板を取り付け、典型的な実際の条件を模擬し、周速度 125.6m/s において、定格出力の軸ねじれ量 0.14deg を測定した。なお、トルク負荷時の回転軸におけるねじり振動の影響を低減するため、軸ねじれの測定値は、測定データの平均値を用いた。

軸ねじれ量 0.14deg を測定した場合の測定誤差の最大値は $7 \times 10^{-4}\text{deg}$ となり、 0.5% の測定精度が確認できた。

Fig. 2 Reflector attached to the surface of the rotating shaft

Fig. 3 Signal on the turbine and generator

5. 実際のプラントにおける検証試験

続いて、実際の蒸気タービンプラントにおいて、測定精度を試験検証した。本試験では、出力伝達軸のタービン側および発電機側に反射板を取り付け、蒸気タービンの出力トルクを測定した。測定した出力トルクを電気出力に換算して図4に示す。図には、発電機の電気出力から求まる蒸気タービンの電気出力を併記した。測定値である蒸気タービンの電気出力は、発電機の電気出力から求まる値に誤差 1% 以内で一致し、測定精度が 1% 程度であることが確認できた。

そこで、定期検査後のリフレッシュ状態の一軸型コンバインドサイクルプラントにおいて、有効性を試験検証した。一軸型コンバインドサイクルプラントでは、ガスタービンと蒸気タービンが一つの回転軸で繋がって発電機を駆動するため、発電機出力は、両タービンの出力和となる。このため、性能低下が発生した場合、発電機出力の情報だけではどちらのタービンが原因で

あるかの特定が困難であり、本技術は、非常に有力な診断手法となる。なお、試験対象のプラントの計画上の出力分担比は、(ガスタービン) : (蒸気タービン) $\approx 2:1$ である。

本試験では、図 5 に示すように蒸気タービンと発電機との間に反射板をそれぞれ取り付け、蒸気タービンの出力トルクを測定した。図 4 と同様、測定値を電気出力に換算して図 6 に示す。また、図には、発電機の電気出力を併記した。発電機の電気出力は、ガスタービンと蒸気タービンの出力和である。本試験では、通常の起動・停止を行う一方、発電機の電氣的負荷を遮断し、出力を瞬間的にゼロにする運転を行い、トルク計測装置の性能を確認した。試験の結果、測定値は、発電機の電気出力に追従する結果が得られた。また、測定値から求まる蒸気タービンの定格出力は、51MW であり、計画値とほぼ一致する。さらに、発電機の電気出力は 156MW であり、(ガスタービン) : (蒸気タービン) = 105MW : 51MW $\approx 2:1$ となって計画上の出力分担比にも一致する。

他方、入出熱法による蒸気タービンの定格出力の解析結果も 51MW であり、測定値と一致する。

以上より、本開発のトルク計測装置は、コンバインドサイクルプラントにおけるタービンの出力トルク測定に有効であると言える。

Fig. 4 Measurement values by laser torque sensor

Fig. 5 Layout of torque sensors at a combined cycle plant

Fig. 6 Steam turbine output measured by laser torque sensor

6. 結 語

出力伝達軸の駆動側および負荷側に取り付けた反射板へ集光照射したレーザの反射光を検出し、検出信号の位相差を相関法によって演算することにより、高精度かつロバストに軸ねじれを求めるトルク計測装置を開発した。実験室内における軸ねじれの測定精度は、0.5%となる。また、実際の蒸気タービンプラントにおける検証試験の結果、測定精度が1%程度であることが確認できた。

そして、実際の一軸型コンバインドサイクルプラントにおいて試験検証を行った結果、測定値の蒸気タービンの出力は、発電機出力の電気出力に追従し、定格出力値および出力分担比が計画値とほぼ一致した。さらに、測定値は、入出熱法による解析値とも一致する。

以上より、本開発のトルク計測装置は、コンバインドサイクルプラントにおけるタービンの出力トルク測定に有効であると言える。

今後も、さらに高精度な性能診断手法の確立を目指し、トルク測定精度の向上を進めていく予定である。

文 献

- (1) Umezawai, S., Diagnosis of Thermal efficiency of Advanced Combined Cycle Power Plants Using Optical Torque Sensors, *JSME International Journal, Series B*, Vol.49, No.2 (2006), pp. 230-236.
- (2) Kuroda, H., Yamashita, T., Saito, I., Sato M., Sakakida, H., Umezawa, S. and Obikawa, H., An Optical Method for High Accurate Torque Measurement of the Turbine in Power Station Using He-Ne Laser, *IEEJ technical meeting documents, Sensors and Micromachines*(2000.12.19-20), pp77-81.
- (3) Saito, I., Umezawai, S., Yamashita, T., Kuroda, H., Sato M. and Obikawa, H., Development of High Accuracy Torque Meter for Combined Cycle, *Train, Proc. JSME Dynamics and Design Conference 2000*, (2000.9).