115 蒸気再熱式原子力プラントにおける熱効率の定量評価に基づく出力増加の検討

Survey for Increase of Power Production Based on Quantitative Evaluation of Thermal Efficiency with Thermal Performance Analysis Simulator for a Reheating Cycle Boiling Water Reactor

○学 中島 千秋(東北大院) 学 坂本 桃子(東北大院)
正 竹田 陽一(東北大) 正 大地 昭生(東北大)

Chiaki NAKAJIMA, Fracture and Reliability Research Institute, Tohoku University, Aoba-6-01, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi
Momoko SAKAMOTO, Fracture and Reliability Research Institute, Tohoku University
Yoichi TAKEDA, Fracture and Reliability Research Institute, Tohoku University
Akio OHJI, Fracture and Reliability Research Institute, Tohoku University

Key words: Nuclear Power Plant, Thermodynamic Analysis, Performance Analysis Simulator, Thermal Efficiency

1. 緒言

原子力発電は、CO₂排出削減効果やエネルギー安定確保の面で優れており、今後さらに重要な電源となることが予想される。従来日本の原子力プラントは定格電気出力一定運転を実施していたが、2001年に熱出力を一定に保つ定格熱出力一定運転が認可され、冬季の海水温度低下による発電出力の上昇やプラント効率の改善を直接電気出力上昇に反映できる運転方法となった。しかし、現在では運転開始から30年以上経過したプラントも存在し、経年化による機器性能の変化に伴い、設計運転状態からのずれ、さらにはプラント効率の低下も考えられる。このような状況で効率よく発電を行うためには、各機器への適切な対処が望ましい。そのため、プラント性能変化の要因特定や、機器性能変化のプラント全体へ及ぼす影響度評価を目的とする性能解析手法の確立が望まれている。

これまでの研究¹⁾において、基本的な原子力発電システムを対象とした熱的性能解析シミュレータが開発され、復水器と低圧タービン(Low Pressure Turbine; LPT)の性能変化に伴う発電端出力の増加率が定量的に明らかにされた。しかし、現在稼働中の原子力プラントの中には、効率向上のため再熱サイクルを採用しているものが多数存在し、システムの複雑化から、これまでのシミュレータでは対応することが困難である。そのため再熱サイクルにも対応した解析手法を開発し、プラント評価へ用いることが望ましい。そこで本研究では、構成機器の熱力学的作動原理に基づき、蒸気再熱式原子力プラントを対象とした熱的性能解析シミュレータを開発し、運転条件の変動や機器性能の変化がプラント電気出力や構成機器状態値に与える影響を定量的に評価する。

2. 熱的性能解析シミュレータの構成条件

2.1 解析プログラムとシミュレータ設計条件

熱的性能解析シミュレータを作成するにあたり、本研究では基盤として電力中央研究所が開発した発電システム熱効率解析汎用プログラム(EgWin)を使用した。このプログラムは、逐次計算法と、線形計算法の長所を組み合わせた新たな計算手法を用いており、多様な発電システムを容易に解析・評価することが可能である。本研究では再熱サイクルを用いた既存の840MW級原子力発電プラントを対象としてシステムを構成し、解析を実施する。

システム構成の概要をFig. 1に示す。設計時のプラント状態を再現するため、設計計画時条件に基づく解析を実施した。本研究では実際の運転を想定し、原子炉からは一定の圧力・温度・湿度の蒸気が発生すると仮定した。

2.1.1 湿分分離加熱器および湿分分離翼

再熱式プラントでは、高圧タービン(High Pressure Turbine; HPT)出口後に湿分分離加熱器を設置しており、湿分分離器での汽水分離と、HPT抽気および主蒸気を加熱源とする二段再熱が行われる。火力プラントと比較すると、原子力プラントは主蒸気が湿り蒸気であるという点で異なり、タービンは湿り域にて運転される特徴がある。しかし再熱式プラントでは、高圧タービン出口後の圧力低下した蒸気が、高温・高圧の蒸気で加熱されることにより乾き蒸気となり、低圧タービン入口でのエンタルピが上昇する結果、低圧タービンでの発電出力が増大する。

低圧タービン入口の蒸気温度は湿分分離加熱器への加熱蒸気量を調整することによって制御されるが、50~100%負荷時にお

Fig. 1 A schematic diagram of reheating cycle BWR

いては可能な限り温度上昇させるため加熱蒸気弁を全開運用しており、LPT入口温度はほぼ一定である。したがって、HPT抽気流量はHPT入口流量によって算出し、主蒸気は湿分分離加熱器出口温度が高温となる十分な流量を採択した。

また、原子力プラントではタービンは大部分が湿り域で運転されるため、タービン内の蒸気のエンタルピは圧力と温度に加えて湿度によって決定する。蒸気中の水滴速度は蒸気速度の約10分の1であるため、水滴はタービンの羽根入口背面に衝突し、ブレーキ作用を引き起こす。したがって湿度の増大によりタービン効率低下する。その対策として、LPT動翼には羽根入口背面部に湿分分離溝が設置され、付着した水分をドレンとして除去している。タービン断熱効率は蒸気の出入口圧力・温度・エンタルピから算出できるが、ドレン除去により蒸気の湿度が低下するため、断熱効率は各段ごとに決定される。また、原子力プラントは火力プラントに比べ熱落差が小さく、LPT最終段での排気損失がタービン出力に大きく影響を与える。

2.1.2 タービン駆動原子炉給水ポンプ

本研究で対象とした発電プラントの原子炉給水ポンプはタービン駆動である。このポンプは給水ポンプ駆動用タービンの回転を直接ポンプ軸動力として利用するため、流量による回転数制御が可能かつエネルギー変換ロスの減少により、常に高効率で駆動できる。給水ポンプ性能はQ-H曲線(吐出量Q [m³/min], 全揚程H[m])で表わされ、効率は設計値より設定した。シミュレータ上で再現するにあたり、駆動タービンとポンプの出力・軸動力を一致させる必要がある。よって流量、揚程よりポンプ軸動力を外部で計算し、タービンに必要な流量を算出し入力した。

2.1.3 構成機器における熱収支の決定

100%・75%・50%・25%部分負荷時設計ヒートバランスを基に設計時のプラント状態を再現するシミュレータを構築した。原子力プラントでは主蒸気の状態値が一定であるため、負荷変動は主蒸気流量の変動により調節している。したがってシミュレータの作成に際し、主蒸気流量を基準にヒートバランスの解析を行った。

給水加熱器の性能は、末端温度差(TD)及び初期温度差(DC)で表される。原子炉給水系の状態を正確に再現するため、給水の出入

口温度とDCを固定し、タービン抽気流量は熱収支から算出するものとした。

プラント熱効率率は以下の式より算出した。

$$Q_s = G_s (H_1 - H_2) \quad \dots(1)$$

$$\eta_{gross} = P / Q_s \times 100 \quad \dots(2)$$

Q_s : 原子炉熱出力 [kJ/s] G_s : 原子炉発生蒸気量 [kg/s]

P : 発電端出力 [kW] H_1 : 原子炉出口エンタルピー [kJ/kg]

H_2 : 原子炉入口エンタルピー [kJ/kg] η_{gross} : グロス熱効率 [%]

3. 熱的性能解析

3.1 シミュレータの妥当性検証

作成したシミュレータの妥当性を検証するため、主蒸気流量を変動させ、発電端出力・熱効率の解析を行った。その際、タービン断熱効率・給水加熱器・再熱器の性能は主蒸気流量に対応して変動するものとした。Table 1に結果を示す。出力は設計値とほぼ同値で、熱効率も最大で誤差約0.41%と精度良く解析できている。したがって本シミュレータの妥当性は示されたと考えられる。

3.2 プラント運転状態の把握

本シミュレータを用いてプラント運用を最適化するためには、現状の運転状態の正確な把握が不可欠である。そこで、一年間のプラント運転の実測値を基に、シミュレータによる熱効率解析を行った。各機器性能を決定づける主蒸気流量を求めるデータとして、HPT入口流量・総主蒸気流量・総給水流量の3項目をそれぞれ採用した場合に対し、解析を行った結果をFig. 2に示す。

発電出力結果より総給水流量及び総主蒸気流量を基準とした計算結果が実測値に最も近い値を示した。また、実測値の出力変動においてはHPT入口流量・総主蒸気流量を基にした計算データが同様の傾向を示した。その原因としては、主蒸気がタービン出力へ直接影響を与えること、また、定格熱出力一定運転のために給水流量の変動が原子炉で抑えられることがあげられる。したがって、正確な運転状態把握のためには総主蒸気流量を用いることが望ましいと考えられる。

3.3 熱効率改善による出力増加の検討

定格熱出力一定運転を実施する原子力プラントでは、熱効率の改善により出力増加が可能である。本研究では熱効率改善策として再熱サイクル採用とタービン最終段長翼化について解析を行った。その際、実際のプラント運転で熱効率変動に最も影響を与える復水器真空度を変化させ、原子炉定格熱出力条件下で熱効率を解析し比較するものとした。

まず、本研究で対象とした原子力プラントが再熱サイクルの適用により得られた熱効率の向上度を、再熱サイクルと非再熱サイクルの比較解析により評価した。非再熱サイクルのシミュレータは、本シミュレータの湿分離加熱器を湿分離器に置換したものとし、主蒸気条件と流量を一致させることにより比較を行った。なお、低圧タービン断熱効率はこれまでの研究で作成された非再熱式原子力プラントを参考に決定した。解析結果をFig. 3に示す。再熱・非再熱共に、復水器真空度の増加に伴いタービン有効熱落差が増大し、熱効率は増加したが、排気損失も増加するため719mmHg付近を境に減少に転じた。また、再熱サイクルを用いたことで、平均3.87%の熱効率向上度が得られたことが分かる。

更に、低圧タービン最終段長翼化を検討する。長翼化により環状面積を増加させ、流出速度を減少させることで排気損失を低減し熱効率の向上を図ることができる。本研究において対象としたプラントの最終段翼長は41in(環状面積約11.5[m²/FLOW])であるが、プラント設備容量を考慮した上でA翼(13.3[m²/FLOW])、B翼(17.3[m²/FLOW])について排気損失曲線を決定し、解析を行った。解析結果をFig. 4に示す。復水器真空度722mmHgの基準時における熱効率向上率は、A翼で1.26%(約10.6MW)、B翼で2.84%(約29.1MW)が見込まれる。A翼の場合、熱効率の最大値は現行タービンと同様に718mmHg前後であるため、タービンのみの改良で、最適運転点が得られる。一方B翼を用いた場合、解析範囲では復水器真空度の増加に伴い熱効率が上昇し続けるため、復水器性能の改善により効果的に出力増加を得ることが可能である。

4. 結言

本研究では、蒸気再熱式原子力プラントをモデルとした主蒸気流量を基準とする熱的性能解析シミュレータを作成し、負荷変動に対して精度良くプラント状態値を再現することができた。それを基に、実際のプラント運転実測値に基づく解析を行い定常運転状態の把握と、プラント熱効率改善による出力増加の検討を行った。その結果、再熱サイクル適用により平均3.87%の熱効率向上

Table 1 Summary of analysis results under the part load conditions

Main steam flow [t/h]	Analysis result		Design value	
	Efficiency [%]	Output [MW]	Efficiency [%]	Output [MW]
2348.07	32.37	419.88	32.31	418.50
3507.12	33.86	629.66	33.78	627.75
4735.16	34.55	839.76	34.41	837.00

Fig. 2 Comparison of power outputs estimated by a simulation vs actual output under operation.

Fig. 3 Thermal efficiencies of reheating cycles vs non reheating cycles.

Fig. 4 Thermal efficiency depending on last stage blade length based on condenser vacuum.

度を得たことが明らかになった。また、タービン最終段長翼化を想定した解析の結果、722mmHg時でA翼1.26%、B翼2.84%の熱効率向上度が得られる他、最適運転のためには復水器性能の改善が重要であることが明らかになった。

本研究で開発した熱的性能解析シミュレータは汎用性が高く、プラント運用の手段として適当なものである。今後、実際の運用に即した、実測値を基に運転状態を把握する解析手法の更なる確立を図る必要がある。

参考文献:

- [1]坂本ら, 原子力プラントの熱的性能解析シミュレータの開発とプラント運用評価, 日本機械学会東北学生会, 第38回卒業研究発表講演会講演論文集, (2006), pp.15-16.
- [2] F.G. Bailey, K. C. Cottor, and R. C. Spencer, Predicting the Performance of Large Steam Turbine-generators Operating with Saturated and Low Superheat Steam Conditions, American Power Conference, April 25-27, (1967)