

〈特集〉

水処理施設を網羅する省エネルギー評価シミュレーションの事例

長倉善則, 向出正章<sup>†</sup>

メタウォーター(株)

(〒105-6029 東京都港区虎ノ門4丁目3番1号 <sup>†</sup>E-mail: mukaide-masaaki@metawater.co.jp)

概要

1997年の京都議定書の採択及び2006年のその発効等, 環境問題やエネルギーに関する意識が世界的に高まっている中, 我々は, 省エネ機器や高効率機器の導入, 最適制御による効率運転などの対策による省エネ効果量を簡単に定量化できる, 浄水場・下水処理場向けの省エネルギー評価シミュレータを開発した。

本稿では, 開発した省エネシミュレータの特徴について述べ, 上下水道において省エネ効果の高いポンプ, ブロワを例題として, 各種制御方式についてのモデルの定式化を行い, 省エネ試算を行った結果について紹介する。

キーワード: BFS法, インバータ制御, 最適流量配分, モデル, 定式化

原稿受付 2008.4.15

EICA: 13(1) 19-22

1. はじめに

環境問題やエネルギーに関する意識が世界的に高まっている。特に, 1997年の京都議定書の採択及び2006年のその発効等を契機に, 地球温暖化ガスの削減に向けて, わが国でも官民挙げてその取り組みが活発化しつつある。

この様な背景のもと, 我々は, 省エネ機器や高効率機器の導入, 最適制御による効率運転等の対策による省エネ効果量を簡単に定量化できる, 浄水場・下水処理場向けの省エネシミュレータを開発してきた。

本稿では, 開発した省エネシミュレータの特徴について述べ, 上下水道において省エネ効果の高いポンプ, ブロワを例題として省エネ試算を行った結果について紹介する。

る手段として高速潮流計算手法である後退・前進計算 (Backward Forward Sweep: BFS) 法<sup>1)</sup>を採用している。

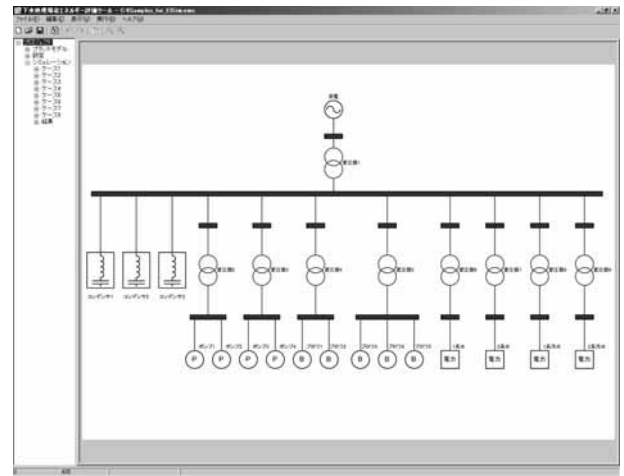


Fig. 1 施設の単線結線図作成画面例

2. 省エネシミュレータの基本機能

省エネシミュレータは下記のモデル機能を有し, Fig. 1, Fig. 2に示すようにGUI (Graphical User Interface) 機能により, 検討対象とする浄水場・下水処理場の構成図を作成可能である。

- ① ポンプモデル
- ② ブロワモデル
- ③ 太陽光発電モデル
- ④ 同期発電機モデル, 誘導発電機モデル
- ⑤ 電力貯蔵電池モデル
- ⑥ 変圧器モデル
- ⑦ 力率改善用コンデンサモデル

なお, 処理場全体の消費電力をシミュレーションす

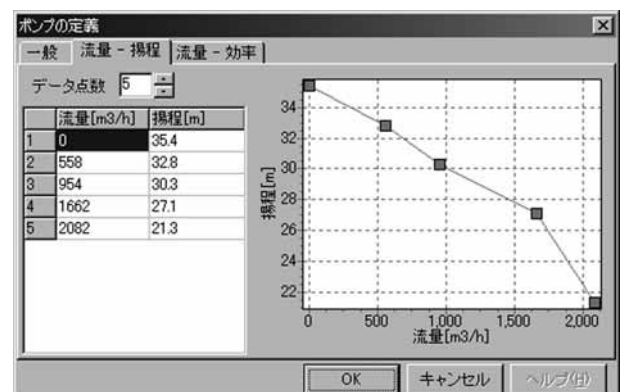


Fig. 2 ポンプモデルの定数入力画面例

### 3. ポンプモデル<sup>2)</sup>

#### 3.1 ポンプモデルの定式化

ポンプモデルは、最も広く使用されている渦巻ポンプの基本機能の模擬を行い、次の3つの制御モードを有するものとした。

- ① 吐出弁制御
- ② 回転数制御による末端圧力一定制御
- ③ 回転数制御による吐出圧力一定制御

例として、吐出弁制御の計算に用いたモデルのポンプの流量-揚程特性、流量-ポンプ効率特性、ポンプの消費電力  $P_V$  [kW] を式 (1)~(3) に示す。

$$H_{pu} = k_{q2} Q_{pu}^2 + k_{q0} \quad (1)$$

$$\eta_p = k_{\eta p2} Q_{pu}^2 + k_{\eta p1} Q_{pu} + k_{\eta p0} \quad (2)$$

$$P_V = \frac{9.8}{3600} \frac{Q_{pu} H_{pu}}{\eta_p \eta_m} Q_0 H_0 \quad (3)$$

ここで、 $H_{pu}$  : 揚程 (pu : per unit)  
 $Q_{pu}$  : 流量 (pu)  
 $\eta_p$  : ポンプ効率 (pu)  
 $Q_0$  : 定格流量 [m<sup>3</sup>/h]  
 $H_0$  : 定格揚程 [m]  
 $\eta_m$  : 電動機効率 [pu]  
 $k_{q2}, k_{q0}, k_{\eta p2}, k_{\eta p1}, k_{\eta p0}$  : 定数

#### 3.2 シミュレーション例<sup>3)</sup>

ポンプの運転方式(吐出弁制御もしくは回転数制御)の違いによる浄水場・処理場全体における1ヶ月分のエネルギー消費量を計算し、省エネ効果の定量化を行った。また、変圧器の種類(標準モールド変圧器もしくは高効率モールド変圧器)、電力用コンデンサの有無についても、併せてシミュレーションを行った。

シミュレーションケースを **Table 1** に示す。尚、シミュレーションに用いた値は以下の値とした。

- ・ 定格流量  $Q_0$  : 6500 m<sup>3</sup>/h
- ・ 定格揚程 :  $H_0$  : 14m
- ・ 実揚程 :  $h_a$  : 10.47m
- ・ 管路抵抗の定数  $h_r$  : 10.67m
- ・ 電動機効率  $\eta_m$  : 94%
- ・ インバータ効率  $\eta_i$  : 97%
- ・ ポンプの性能曲線データ : **Table 2**

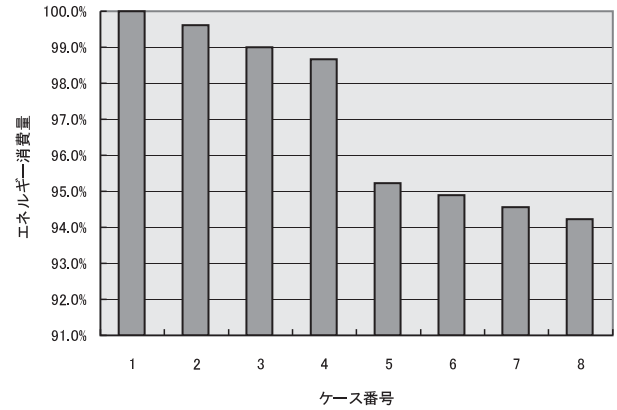
**Fig. 3** に、シミュレーション結果を示した。**Fig. 3** より、ケース1~4に比較し、ケース5~8は最大5.4%の省エネが得られており、省エネ効果が大きいことがわかる。これは、ポンプの運転方式をケース1~4が吐出弁制御としているのに対し、ケース5~8は回転数制御としているためである。

**Table 1** シミュレーションケース

ケース	変圧器	コンデンサ	ポンプ
1	標準モルトラ	なし	吐出弁制御
2	高効率モルトラ	なし	吐出弁制御
3	標準モルトラ	あり	吐出弁制御
4	高効率モルトラ	あり	吐出弁制御
5	標準モルトラ	なし	回転数制御
6	高効率モルトラ	なし	回転数制御
7	標準モルトラ	あり	回転数制御
8	高効率モルトラ	あり	回転数制御

**Table 2** ポンプの性能曲線データ

番号	流量 $q_i$ [m <sup>3</sup> /h]	揚程 $h_i$ [m]	ポンプ効率 $\eta_{pi}$ [%]
1	0	24.8	0
2	840	24.0	24
3	1740	23.0	45
4	2580	22.0	60
5	3480	19.6	72
6	4200	18.0	80
7	4680	16.4	83
8	5760	14.0	84
9	6600	10.4	83
10	7200	8.0	77



**Fig. 3** 1ヶ月のエネルギー消費量に関するケース比較

#### 3.3 回転数制御ポンプの最適流量配分機能<sup>4-6)</sup>

##### (1) 最適流量配分の定式化

複数台のポンプの消費電力  $P_V$  を各ポンプへの流量  $x_i$  の関数で表現すると次式となり、この消費電力  $P_V$  を最小化する各ポンプへの流量  $x_i$  を決定する問題に定式化される。

最小化 :

$$P_V(x_1, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N \frac{A_i x_i^3 + B_i x_i}{C_i x_i^2 + D_i + x_i \sqrt{E_i x_i^2 + F}} \quad (4)$$

制約条件 :

$$\begin{cases} Q_T = \sum_{i=1}^N x_i \\ x_i \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 $N$  : 全ポンプ数

$A_i, B_i, C_i, D_i, E_i, F_i$  : ポンプの特性から得られる係数

上式は非線形かつ多峰性関数(複数の最適解をもつ

関数)であるため、一般に最適解を求めることが難しい。そこで、われわれが独自に開発した「複数の最適解を求解可能な非線形システムの安定性理論」<sup>7,8)</sup>に基づく最適化手法を適用し最適な流量配分を求める。

(2) シミュレーション例

吐出弁制御のポンプ2台、回転数制御のポンプ2台、計4台のポンプの運転を例に、最適流量配分機能の性能評価を行う。なお、シミュレーションに用いた値は浄水場・下水処理場で一般的に使用されている以下の渦巻ポンプの標準的なデータとした。

- ・全流量：19000m<sup>3</sup>/h
- ・実揚程：10.47m
- ・管路抵抗係数：11.47m
- ・各ポンプのデータ：Table 3
- ・ポンプの性能曲線データ：Table 4

Table 5の結果から、消費電力が最小となるような流量配分は流量配分3となる。また、流量配分1は2

Table 3 ポンプ特性

	X1 ポンプ	X2 ポンプ	Y1 ポンプ	Y2 ポンプ
制御方法	吐出し弁制御	吐出し弁制御	回転数制御	回転数制御
定格流量 [m <sup>3</sup> /h]	6500	8300	6500	8300
定格揚程 [m]	14	16	14	16
電動機効率 [%]	94	94	94	94
インバータ効率 [%]	—	—	97	97

Table 4 ポンプの流量—揚程特性

ポンプ X1, Y1			ポンプ X2, Y2		
流量 [m <sup>3</sup> /h]	揚程 [m]	ポンプ効率 [%]	流量 [m <sup>3</sup> /h]	揚程 [m]	ポンプ効率 [%]
0	24.8	0	0	29.7	0
840	24.0	24	1008	28.8	22.80
1740	23.0	45	2088	27.6	42.75
2580	22.0	60	3096	26.4	57.00
3480	19.6	72	4176	23.5	68.40
4200	18.0	80	5040	21.6	76.00
4680	16.4	83	5616	19.6	78.85
5760	14.0	84	6912	16.8	79.80
6600	10.4	83	7920	12.4	78.85
7200	8.0	77	8640	9.6	73.15

Table 5 得られた最適化流量配分

	X1 ポンプ [m <sup>3</sup> /h]	X2 ポンプ [m <sup>3</sup> /h]	Y1 ポンプ [m <sup>3</sup> /h]	Y2 ポンプ [m <sup>3</sup> /h]	消費電力 [kW]	候補
流量配分 1 (LM1)	6419.7	8234.3	2167.4	2178.1	821.1589	3
流量配分 2 (LM2)	6419.7	8234.3	0	4345.3	775.6174	2
流量配分 3 (LM3)	6419.7	8234.3	4345.3	0	764.6166	1

台のポンプを回転数制御により省エネ運転している場合であり、これに近い流量配分で通常運転が行われていると想定すると、流量配分3での運転を行った場合、通常運転時に近い流量配分1と比較し7%の省エネ効果が得られる事となる。

本手法は、複数の省エネ効果が高い流量配分パターンを計算するため、計算値がポンプの定格を逸脱した場合は、現場の運用状態を考慮し、複数の省エネ運転パターンから適切なパターンを選択することも可能である。

4. ブロワモデル

4.1 ターボブロワモデルの定式化<sup>9)</sup>

本稿では、ターボブロワのモデル化について述べる。

下水処理場の曝気ブロワでは、水深による固定抵抗の割合が大きいため圧力低下の大きい回転数制御は適さない。従って、以下の制御モードを有するものとした。

- ① 吐出弁制御
- ② インレットベーン制御 (吸込ベーン制御)

吐出弁制御のターボブロワの風量—吐出圧力特性、風量—全断熱効率特性、ターボブロワの消費電力  $P_v$  [kW] を次式に示す。

$$P_{pu} = k_{p2}Q_{pu}^2 + k_{p1}Q_{pu} + k_{p0} \tag{6}$$

$$\eta_{bpu} = k_{\eta b2}Q_{pu}^2 + k_{\eta b1}Q_{pu} + k_{\eta b0} \tag{7}$$

$$P_v = \frac{k}{k-1} \times \frac{QP_1}{60} \times \left\{ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right\} \times \frac{1}{\eta_{bpu}\eta_{mpu}} \tag{8}$$

- ここで、 $P_{pu}$  : 吐出圧力 (pu)  
 $Q_{pu}$  : 風量 (pu)  
 $\eta_{bpu}$  : 全断熱効率 (pu)  
 $Q$  : 風量 (m<sup>3</sup>/min)  
 $P_1$  : 吸込絶対圧力 (kPa)  
 $P_2$  : 吐出絶対圧力 (kPa)  
 $K$  : 比熱比  
 $\eta_{mpu}$  : 電動機効率 (pu)  
 $k_{p2}, k_{p1}, k_{p0}, k_{\eta b2}, k_{\eta b1}, k_{\eta b0}$  : 定数

インレットベーン制御は、ベーン (羽根) の角度を変えて性能を変えることにより風量制御を行うものである。それぞれのベーン角に対する計算方式は吐出弁制御と同じである。ただし、すべてのベーン角度の性能曲線を指定することは実質不可能なため、数個のベーン角度における性能曲線を入力して、不足分は入力された性能曲線から線形補間で求める。

台数制御を行う場合、個々のブロワの風量—吐出圧力特性の合成特性から、個々のブロワの風量と全ブロワ共通の吐出圧力を求める必要がある。基本的な計算式は式 (6)~(8) で示した単機ブロワと同様である

が、以下の条件が付く。

- 1) 要求風量に対する圧力を式 (6) 式で求める際は、各種係数  $k_{p2}$ ,  $k_{p1}$ ,  $k_{p0}$  は合成特性から求めた定数となる。
- 2) 1) で求めた圧力を全ブロワ共通の圧力とする。
- 3) 全ブロワの合計風量を要求風量とする。

上記の条件を満たす解を算出するため、ニュートン法を用いて個々のブロワの風量及び吐出圧力を求める。

#### 4.2 シミュレーション例

定格風量  $80\text{m}^3/\text{min}$ 、定格圧力  $71.6\text{kPa}$ 、吸込静圧  $-2.0\text{kPaG}$  ( $\text{kPaG}$ : ゲージ圧)、電動機効率  $95\%$ 、電動機効率  $90\%$ 、性能曲線データを **Table 6** の値としたターボブロワ 3 台において、吐出弁制御の当該風量におけるターボブロワの消費電力を **Table 7** に示す。**Table 7** に示す通り、風量の削減量に比べ、消費電力の削減量が小さいという吐出弁制御の特徴が得られている。

**Table 6** ターボブロワの性能曲線データ

吸込風量 [ $\text{m}^3/\text{min}$ ]	静圧 [ $\text{kPa}$ ]	全断熱効率 [%]
0	73.8	0.0
10	80.0	23.1
20	84.4	40.0
30	86.3	50.0
40	86.0	56.9
50	84.4	61.3
60	81.3	65.0
70	77.8	66.9
80	72.5	67.8
98	60.0	67.8

**Table 7** ターボブロワの消費電力 [ $\text{kW}$ ]

	ケース 1	ケース 2	ケース 1 比
風 量 [ $\text{m}^3/\text{min}$ ]	240.0	120.0	50.0%
消費電力 [ $\text{kW}$ ]	364.4	259.6	71.2%

## 5. あ と が き

本稿では、省エネルギー評価ツールとして開発した浄水場、下水処理場向けの省エネシミュレータの特徴について述べ、上下水道において省エネ効果の高いポンプ、ブロワを例題として、省エネ効果について紹介した。

本省エネシミュレータを活用した、総合的な省エネ対策をご提案していくことが、地球温暖化対策の一端を担う事となれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 福山・他:「並列処理を用いた放射状系統高速潮流計算」電気学会論文誌, B116 巻 1 号 (1996)
- 2) 新訂エネルギーセンター管理技術 電気管理編, 省エネルギーセンター編, 財団法人省エネルギーセンター (2002)
- 3) 中沢, 福山, 長倉, 花田, 上下水道の省エネルギー評価手法について, 第 16 回環境システム計測制御 (EICA) 研究発表会 (2004)
- 4) 中沢, 福山, 小林: 非線形システムの安定性理論を用いた最適化手法による複数台インバータ駆動ポンプの省エネ運転方式, 第 5 回計測自動制御学会制御部門大会 (2005)
- 5) C. Nakazawa, Y. Fukuyama and Y. Nagakura, "Optimal Pump and Inverter Control for Drinking Water and Wastewater Treatment Systems", SICE Annual Conference 2005 (2005)
- 6) 大井, 中沢, 渡辺, 福山, 菊池, 小林: 浄水場における複数ポンプ省エネ運転制御方法, 第 6 回計測自動制御学会制御部門大会 (2006)
- 7) 中沢, 北川, 福山: 非線形ダイナミクスの安定性理論による大域的最適解最有力候補の導出方法, 電気学会産業計測制御研究会 (IIC-04-50) (2004)
- 8) C. Nakazawa, S. Kitagawa, Y. Fukuyama and H. D. Chiang: "A Method for Searching Multiple Local Optimal Solutions of Nonlinear Optimization Problems," 2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS2005) Kobe, Japan (2005)
- 9) 尾形俊輔編著:「改訂 ファン・ブロワ」, 財団法人省エネルギーセンター (2003)