「GENESEED solution」省エネルギーシミュレータ

小林　憲徳（こばやし　のりよし）　安久津 信也（あくつ　しんや）　福山　良和（ふくやま　よしかず）

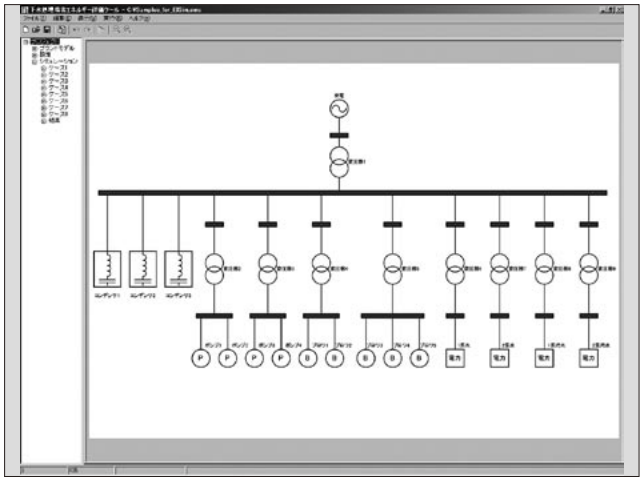
1　まえがき

これまで「エネルギーの使用の合理化に関する法律」（省エネ法）による工場・事業所などのエネルギー管理については，一定以上の電気あるいは熱を使用する工場・事業所を対象としてきた。これに対し2005年の省エネ法の改正（2006年4月1日施行）により，電気負荷と熱負荷の区分が廃止され，電気負荷量と熱負荷量の合計値を規制する，電気と熱の一体管理が実施されることとなった[(1)]。この省エネ法の改正により，これまでエネルギー管理の規制対象外であった中小規模の浄水場，下水処理場が第一種もしくは第二種エネルギー管理指定工場の対象となり，浄水場，下水処理場の主要設備であるポンプ，ブロワなどの主要負荷の省エネルギー対策がさらに重要となってきた。

このような背景のもと，富士電機では，省エネルギー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ルギー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シミュレータを開発した。

本稿では，「GENESEED solution」省エネルギーシミュレータの特長について述べ，典型的な浄化センターを例題として省エネルギー試算を行った結果について紹介する。

図1　施設の単線結線図作成画面例



2　省エネルギーシミュレータの基本機能

省エネルギーシミュレータは次のモデル機能を有し，**図1**，**図2**に示すようにGUI（Graphic User Interface）機能により検討対象とする浄水場，下水処理場の施設における電源系統の単線結線図の作成が可能である。

(1)　ポンプモデル
　○吐出し弁制御
　○回転速度制御による末端圧力一定制御
　○回転速度制御による吐出圧力一定制御
　○吐出し弁，インバータ制御の混在運転が可能
　○回転速度制御ポンプの最適流量配分機能

(2)　ブロワモデル

(3)　太陽光発電モデル
　○有効電力設定

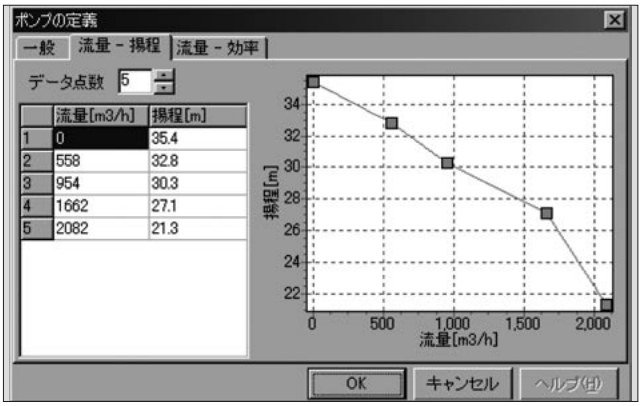
(4)　同期発電機モデル，誘導発電機モデル
　○有効電力と無効電力設定もしくは有効電力と力率設定

(5)　電力貯蔵電池
　○有効電力と無効電力設定

(6)　変圧器モデル
　○負荷損（抵抗で設定）と無負荷損

(7)　電力用コンデンサモデル
　○直列リアクトル付

図2　ポンプモデルの定数入力画面例



小林　憲徳

上下水道用電気・計装システムの設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社環境システム本部水処理統括部GENESEED技術部担当課長。

安久津 信也

上下水道用電気・計装システムの設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社環境システム本部水処理統括部GENESEED技術部。

福山　良和

数理アルゴリズムを利用したソリューション研究開発業務に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー株式会社情報通信制御部課長。工学博士。電気学会上級会員，IEEE会員。

表1　ポンプの性能曲線データ

番　号	流量 q_i（m^3/h）	揚程 h_i（m）	ポンプ効率 η_{pi}（%）
1	0	24.8	0
2	840	24.0	24
3	1,740	23.0	45
4	2,580	22.0	60
5	3,480	19.6	72
6	4,200	18.0	80
7	4,680	16.4	83
8	5,760	14.0	84
9	6,600	10.4	83
10	7,200	8.0	77

なお，処理場全体の消費電力をシミュレーションする手段として高速潮流計算手法である後退・前進計算（BFS：Backward Forward Sweep）法[(2)]を採用している。

3　ポンプモデル[(3)]

3.1　定式化

省エネルギーシミュレータの主要モデルの一つであるポンプモデルについて紹介する。

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，次の三つの制御モードを有するものとした。

(1)　吐出し弁制御

(2)　回転速度制御による末端圧力一定制御

(3)　回転速度制御による吐出圧力一定制御

例として，吐出し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）を以下に示す。

ここで，H_{pu}（pu）は揚程，Q_{pu}（pu）は流量，η_p（pu）はポンプ効率，Q_0 は定格流量（m^3/h），H_0 は定格揚程（m），η_m は電動機効率（pu），k_{q2}，k_{q0}，$k_{\eta p2}$，$k_{\eta p1}$，$k_{\eta p0}$ は定数である。

$$H_{pu} = k_{q2}Q^2_{pu} + k_{q0}$$

$$\eta_p = k_{\eta p2}Q^2_{pu} + k_{\eta p1}Q_{pu} + k_{\eta p0}$$

$$P_v = \frac{9.8}{3{,}600}\frac{Q_{pu}H_{pu}}{\eta_p\eta_m}Q_0H_0$$

3.2　シミュレーション例[(4)]

変圧器の種類（標準モルトラもしくは高効率モルトラ），電力用コンデンサの有無，ポンプの運転方式（吐出し弁制御もしくは回転速度制御）の違いによる処理場全体における1か月分のエネルギー消費量を計算し，省エネルギー効果の定量化を行った。シミュレーションケースを**表1**に示す。なお，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_0：6,500（m^3/h）

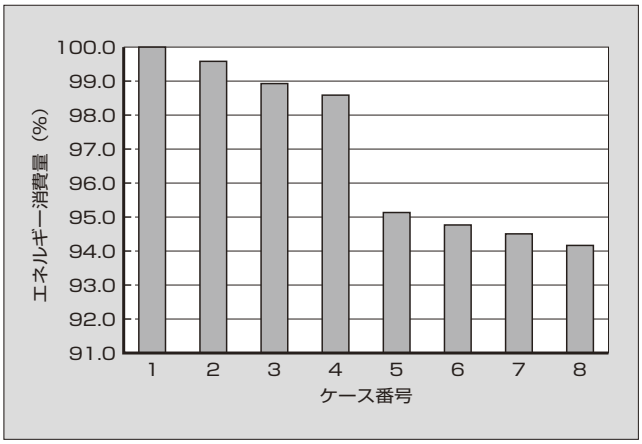
○定格揚程：H_0：14（m）

○実揚程：h_a：10.47（m）

表2　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	吐出し弁制御
2	高効率モルトラ	なし	吐出し弁制御
3	標準モルトラ	あり	吐出し弁制御
4	高効率モルトラ	あり	吐出し弁制御
5	標準モルトラ	なし	回転速度制御
6	高効率モルトラ	なし	回転速度制御
7	標準モルトラ	あり	回転速度制御
8	高効率モルトラ	あり	回転速度制御

図3　1か月のエネルギー消費量による各ケースの比較



○管路抵抗の定数 h_r：10.67（m）

○電動機効率 η_m：94（%）

○インバータ効率 η_i：97（%）

○ポンプの性能曲線データ：**表2**

図3にシミュレーション結果を示す。**図3**から，ケース1～4に比較し，ケース5～8は最大5.4%の省エネルギーが得られており，省エネルギー効果が大きいことが分かる。これは，ポンプの運転方式を吐出し弁制御から回転速度制御にしたためである。

4　回転速度制御ポンプの最適流量配分機能[(5)～(7)]

浄水場，下水処理場では，一般にポンプにインバータを取り付け，回転速度の制御により省エネルギー対策を実施しており，前章のシミュレーション例に示したように，インバータ制御によるポンプの省エネルギー運転が達成できる。

複数台の特性の異なるポンプを同時にインバータで制御する場合，ポンプの消費電力は各ポンプへの流量配分に依存するが，従来法では各ポンプ相互の流量配分調整は考慮されていない。このため，従来法での複数台ポンプの省エネルギー運転では，不適切な流量配分となり十分な省エネルギー効果が得られない場合がある。

そこで，富士電機では，前述のポンプモデルと非線形システムの安定性理論を用いた最適化手法[(8)(9)]により複数台ポン

プの省エネルギー運転を行う手法の開発を行った。

図 4 に，提案する最適流量配分機能の概念図を示す。任意の「初期値□」から，はじめの最適解を探索し，探索領域内にある「最適解○」を指定された時間内に，できるだけ多く探索していく手法である。このとき，探索を効率よく行うため分解点と呼ばれる目的関数の「尾根の低い所△」を経由して，システマチックに複数の最適解の求解を行う。この分解点を経由する方法は，人が盆地から山を越えて，隣の盆地に移動する際に，尾根の低い点である峠を経由して移動することと似ている。

本手法により，省エネルギー効果が高い運転パターンである解を正確に求めることができ，十分な省エネルギー効果を得ることができる。また，この手法により，局所解となる省エネルギー運転パターンを複数求めることが可能となるため，現場のルールやポンプの制約条件などで消費電力が最小値となる運転パターンで運転することができない場合でも，複数の省エネルギーパターンの中から制約条件の下での適切なパターンを選択することができる。

4.1　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。各ポンプへの流量 x_i の合計はポンプでくみ上げる全流量 Q_T であり，各ポンプへの流量は正の値のみ取るので，これらを制約条件とした。

$$\text{最小化：} P_v(x_1,\cdots,x_N)=\sum_{i=1}^{N}\frac{A_i x^3_i+B_i x_i}{C_i x^2_i+D_i+x_i\sqrt{E_i x^2_i+F_i}}$$

$$\text{制約条件：}\begin{cases} Q_T=\sum_{i=1}^{N}x_i \\ x_i\geqq 0 \end{cases}$$

ここで，N は全ポンプ数，A_i，B_i，C_i，D_i，E_i，F_i はポンプの特性から得られる係数である。

上式は非線形かつ多峰性関数（複数の最適解を持つ関数）であるため，一般に最適解を求めることが難しい。そこで，富士電機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に基づく最適化手法を適用し最適な流量配分を求める。

4.2　シミュレーション例

吐出し弁制御のポンプ２台，回転速度制御のポンプ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。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：19,000（m^3/h）
○実揚程：10.47（m）
○管路抵抗係数：11.47（m）
○各ポンプのデータ：**表 3**

図 4　最適流量配分機能の概念図

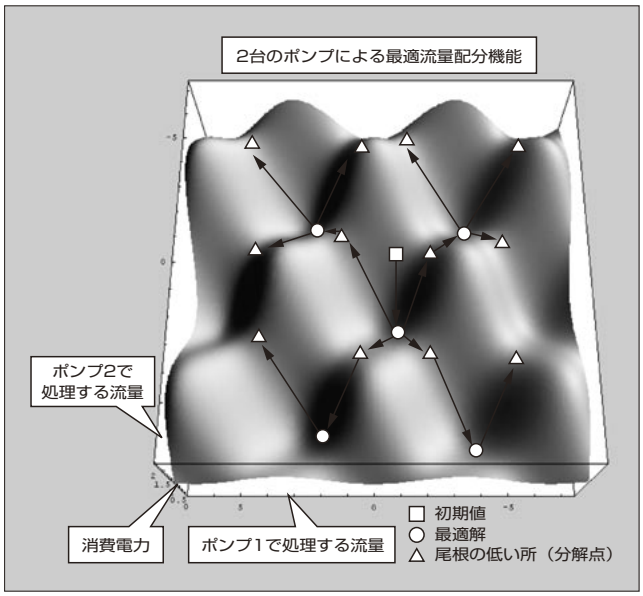


表 3　ポンプ特性

	ポンプX1	ポンプX2	ポンプY1	ポンプY2
制御方法	弁制御	弁制御	回転速度制御	回転速度制御
定格流量（m^3/h）	6,500	8,300	6,500	8,300
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

表 4　ポンプの流量－揚程特性

ポンプX1，Y1			ポンプX2，Y2		
流量（m^3/h）	揚程（m）	ポンプ効率（%）	流量（m^3/h）	揚程（m）	ポンプ効率（%）
0	24.8	0	0	29.7	0
840	24.0	24	1,008	28.8	22.80
1,740	23.0	45	2,088	27.6	42.75
2,580	22.0	60	3,096	26.4	57.00
3,480	19.6	72	4,176	23.5	68.40
4,200	18.0	80	5,040	21.6	76.00
4,680	16.4	83	5,616	19.6	78.85
5,760	14.0	84	6,912	16.8	79.80
6,600	10.4	83	7,920	12.4	78.85
7,200	8.0	77	8,640	9.6	73.15

表 5　得られた最適化流量配分

	ポンプX1（m^3/h）	ポンプX2（m^3/h）	ポンプY1（m^3/h）	ポンプY2（m^3/h）	消費電力（kW）	候補
流量配分1（LM1）	6,419.7	8,234.3	2,167.4	2,178.1	821.1589	3
流量配分2（LM2）	6,419.7	8,234.3	0	4,345.3	775.6174	2
流量配分3（LM3）	6,419.7	8,234.3	4,345.3	0	764.6166	1

図 5　目的関数と得られた最適流量配分（最適値）

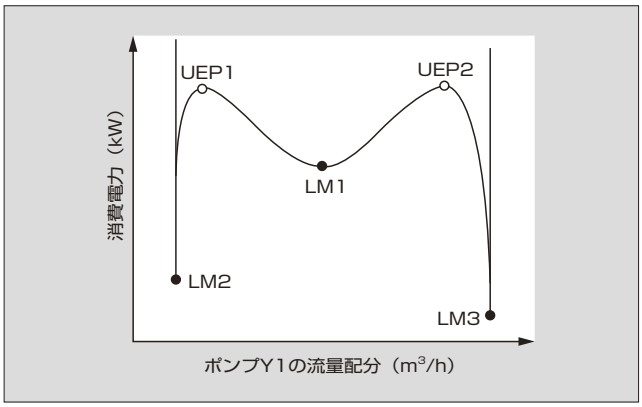
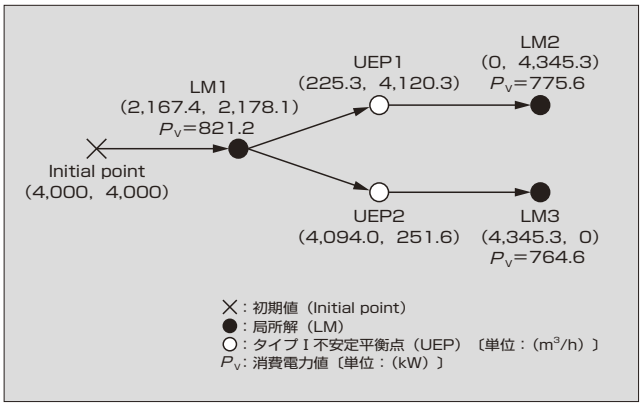


図 6　探索の過程



○ポンプの性能曲線データ：**表 4**

表 5 にシミュレーション結果，**図 5**，**図 6** に目的関数の概念図と探索の過程を示す。これらに示すように本例題では，三つの最適解が得られた。これを LM1，LM2，LM3 で示す。UEP1，UEP2 は分解点である。

表 5，**図 5**，**図 6** 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（LM3）となる。また，流量配分 1（LM1）は 2 台のポンプを回転速度制御により省エネルギー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％の省エネルギー効果が得られた。

本手法は，複数の省エネルギー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，複数の省エネルギー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。

回転速度制御ポンプの最適流量配分機能の特長として，以下の項目があげられる。

(1)　ポンプ特性（流量－揚程特性，流量－効率特性）を考慮した複雑な非線形最適化問題であるポンプ流量配分問題に対し，正確な局所解を得ることにより，高い省エネルギー効果を得ることができる。

(2)　複数の正確な局所解（複数の省エネルギー運転パターン）を求めることが可能となり，定式化されていない現場のルールやポンプの制約条件などによって最も省エネルギー効果が高い運転パターン（大域的最適解）での運転ができない場合でも，複数の省エネルギー運転パターンから適切なパターンを選択することができる。

5　あとがき

本稿では，省エネ法の改正に伴い開発した浄水場，下水処理場向けの省エネルギーシミュレータの特長について述べ，某浄化センターの実績データを用いた場合の省エネルギー効果について紹介した。

今後は，開発した浄水場，下水処理場向けの省エネルギーシミュレータの高機能化を行うと同時に，水処理プロセスシミュレータ，汚泥処理プロセスシミュレータとの統合により総合的な省エネルギー対策を提案していく所存である。

参考文献

(1)　平成 17 年度技術講座「省エネ法改正」の動向．省エネルギーセンター．2005-9.

(2)　福山良和，中西要祐．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．vol.B116, no.1, 1996-1.

(3)　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，省エネルギーセンター．2002.

(4)　中沢親志ほか．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.

(5)　中沢親志ほか．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．

(6)　Nakazawa, C. et al. Optimal Pump and Inverter Control for Drinking Water and Wastewater Treatment Systems. SICE Annual Conference 2005.

(7)　大井章弘ほか．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.

(8)　中沢親志ほか．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）．

(9)　Chiang, D. A Method for Searching Multiple Local Optimal Solutions of Nonlinear Optimization Problems. 2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS2005). Kobe.

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。