特集

上下水道プラントのエネルギーマネジメントとパワーエレクトロニクス技術

長倉　善則（ながくら　よしのり）　安久津 信也（あくつ　しんや）　山本 総一郎（やまもと　そういちろう）

1　まえがき

1997 年 12 月の京都議定書の採択に始まった地球温暖化防止の取組みは，二酸化炭素（CO_2）排出量の削減から窒素酸化物（NO_x），硫黄酸化物（SO_x），環境ホルモンなど有害物質の抑制，地球環境保全への取組みに拡大してきている。

2006 年 4 月に「エネルギーの使用の合理化に関する法律の一部を改正する法律」（改正省エネ法）が施行されてから，上下水道事業体においても電気負荷と熱負荷の合計値でエネルギー管理レベルが設定され，さらに CO_2 排出原単位の計画的縮減を要求される中で，ますます環境負荷を低減した事業所運営が求められている。上下水道事業体に環境 ISO 取得，大規模太陽光発電など自然エネルギー導入の動きが広がっているのもこのような社会情勢による。

社会インフラの基盤である上下水道事業ではエネルギーの有効利用（未利用，省エネルギー）のほか，施設の安定稼動のための電源品質の維持も重要であり，CO_2 排出原単位が少なく従量料金の安価な夜間電力を利用し，停電時には非常用発電設備として機能する電力貯蔵システムの導入も活発化している。

上下水道プラントで使用するエネルギーと包蔵するエネルギーを効率よく利用するためにはエネルギーマネジメントが重要であり，その実現手段としてパワーエレクトロニクス技術を駆使した製品がその課題を解決する重要な構成要素となる。

本稿では，上下水道プラントにおけるエネルギーマネジメントの現状と関連する最近のパワーエレクトロニクス技術について紹介する。

2　上下水道プラントのエネルギーマネジメント

上下水道プラントが包蔵するエネルギーとしてまず挙げられるのは，水の位置エネルギーと熱エネルギーである。

位置エネルギーは取水地点と受水地点間の有効落差として，熱エネルギーは年間を通じてほぼ一定である下水と冷媒に接触する外気などとの温度差として存在する。

また，下水中のメタンなど水に含まれる物質のエネルギーや施設に注がれる日射，風などのエネルギーも有効に利用できる可能性を持っている。

一方，上下水道プラントが利用するエネルギーの大部分は電気エネルギーで大半が水や空気の輸送に使用されるため，エネルギー排出原単位の削減を検討するうえでポンプ，ブロワなどの流体機械が主要な省エネルギーの対象設備となり，場合によっては大きい省エネルギー効果が得られる。

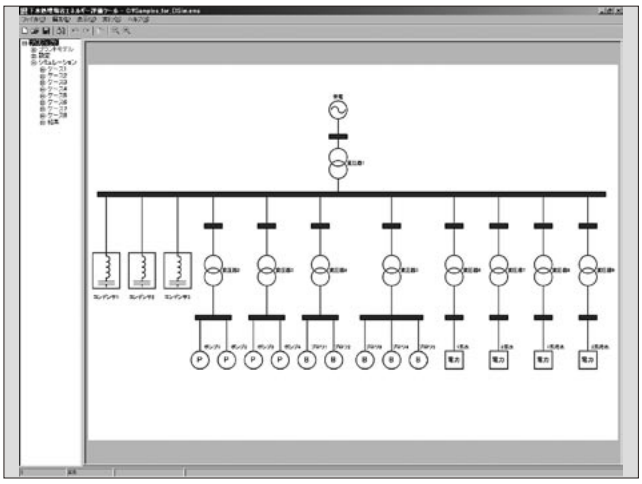
上下水道プラントのエネルギーマネジメントは，以上述べた施設が包蔵するエネルギーを有効に利用し，省エネルギーとあいまって化石燃料由来のエネルギーの消費量をいかに低減するか，さらにこれらのエネルギー源を相互にかつ電力系統と安定的に連系させて，電源の品質をいかに維持していくかをマネジメントすることといえる。

ここでは，電力原単位削減のエネルギーマネジメントに有効な省エネルギー評価シミュレータの機能とシミュレーション結果を紹介する。

2.1　省エネルギー評価シミュレータ[1]

このシミュレータは以下に示す負荷および電源の部品モ

図 1　電力系統の模擬回路作成画面例



長倉　善則

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機電技術部長。電気学会会員。

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。

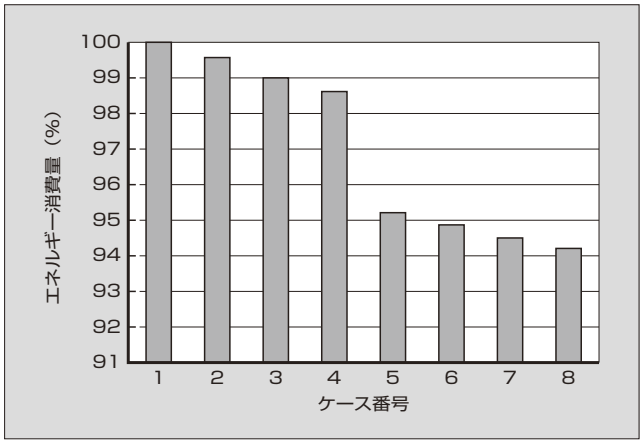
山本 総一郎

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副統括部長。電気学会会員。

表１　省エネルギー項目の組合せとシミュレーションケース番号

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２　１か月のエネルギー消費量比較



デルを持ち，GUI（Graphical User Interface）機能により検討対象の上下水道プラントの電力系統を模擬することができる。

図１に模擬した上下水道プラントの電力系統の例を示す。模擬できる部品は以下のとおりとなっている。

(1)　ポンプ
　○吐出し弁制御
　○回転速度制御による圧力一定制御
　○吐出し弁制御とインバータ制御の混在
(2)　ブロワ
(3)　太陽光発電
(4)　発電機（同期発電機，誘導発電機）
(5)　電力貯蔵設備
(6)　変圧器

2.2　シミュレーション結果

図１の電力系統において変圧器を高効率形にした場合，コンデンサによる力率改善を実施した場合，ポンプを回転速度制御した場合を省エネルギー対策項目としてシミュレーションしたケースを**表１**に示す。また，組合せのケースごとにエネルギー消費量をシミュレーションにて求めた結果を**図２**に示す。

このケースでは，変圧器の高効率化で0.4％，力率改善で１％，可変速制御で4.7％の省エネルギーとなる結果が得られた。毎年１％の電力原単位の削減を計画する場合，投資額が少なく効果の高い順に実施することとなるが，この場合，初年度で力率改善，その後５年間で変圧器の高効率化と可変速制御の導入を行えば，６年のエネルギー原単位の削減が可能であることが分かる。投資対効果が明確になれば，設備導入のための住民説明にも有用と考えられる。

3　パワーエレクトロニクス技術

3.1　省エネルギー機器

電圧形VVVF（Variable Voltage Variable Frequency）は，パワートランジスタの普及により堅牢（けんろう）で保守が容易なかご形誘導電動機を回路構成が簡素で安価な周波数変換で駆動する装置として，電流形VVVFやサイリスタセルビウスに替わって導入が開始された。

その後，パワートランジスタの高耐圧化・大電流化に伴って大容量化が進んだことと，PWM（Pulse Width Modulation）コンバータや入力変圧器多巻線化，コンバータのマルチレベル化など高調波抑制対策が可能となったことで，現在，ポンプやブロワの可変速制御装置の主流となり，上下水道プラントの主要機器の有効な省エネルギー手段となっている。今後もさらに高電圧化と，変換装置および電動機の高効率化が進むものと考えられ，変換装置の高効率化としてマトリックスコンバータ，高耐圧化として高圧ダイレクトVVVF，電動機の高効率化としてPM（Permanent Magnet）モータの例を述べる。

(1)　マトリックスコンバータ[(2)]

富士電機では，低圧VVVFの効率向上とコンパクト化を狙ってAC-AC直接変換方式のマトリックスコンバータを製品化している。

従来のマトリックスコンバータが出力可能な正弦波電圧の最大値は入力電圧の86.6％で，標準電圧の電動機を駆動する場合には過変調領域で生じる低周波のトルク脈動と入出力電流のひずみの増大を抑制することが必要となる。これは，マトリックスコンバータが入力電源電圧を直接変換するため，過変調領域で特定のスイッチのオン状態が継続することによって発生する。

この対策にビートレス制御[(3)]を採用したマトリックスコンバータを開発した。この製品は電圧形VVVFに対し，入力電流ひずみ率が若干増加するものの，変換効率を10％向上でき，標準電圧の電動機を駆動できることが特徴である。

(2)　高圧ダイレクトVVVF

高圧ダイレクトVVVFは，多相化した入力変圧器から各相を絶縁された複数の単相インバータで切り出し，出力側で直列接続して電動機に直接高圧電力を供給する方式である。入力変圧器の多相化で電源高調波をガイドライン以下に，３レベルの単相インバータを２直列ないし４直列とすることで出力電圧レベルを９レベルないし17レベル相当とし，入出力電流を正弦波に近づけた電源と電動機に優しいインバータとなっている。

さらに上下水道プラントの既設誘導電動機用可変速制御

装置の更新需要にも適用できるように，出力電圧リプルを定格電圧の10％以内に抑えた低リプル機能，100％速度に到達した後にVVVFをバイパスして商用電源に切り換える同期切換機能をオプション設定した仕様としている。

高圧ダイレクトVVVFの仕様を**表2**に示す。

(3)　PMモータ

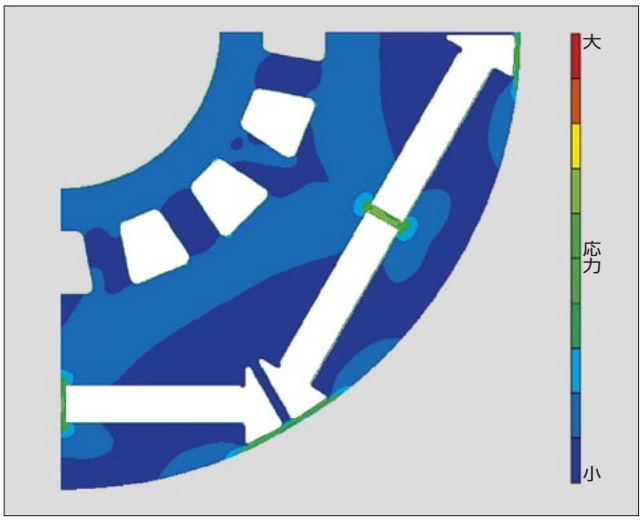
上下水道プラントの汚泥処理設備で使われる遠心分離機は，省エネルギーのほか慣性モーメントを低減する小型化や回転速度制御装置も含めた低価格化への要求が強い。

PMモータは回転子に永久磁石を用いて回転子の損失（負荷損失と励磁損失）をなくし高効率化とコンパクト化が可能である。開発したPMモータは，磁気回路と回転子強度などの最適化設計を行うことで，誘導電動機に比べ効率を2％向上，質量を40％低減，体積を50％低減した（214kW機の場合）。回転子強度解析例を**図3**に，磁束密度解析例を**図4**に示す。また，PMモータは回転子に励磁回路を持たないため力率もよく，入力電流を17％低減でき，適用する回転速度制御装置を小型化できる。**表3**に遠心分離機用PMモータの概略仕様を示す。

表2　高圧ダイレクトVVVFの仕様

仕様項目		3.3kVクラス	6.6kVクラス
出力容量範囲		280～3,750kVA	560～7,500kVA
適用電動機出力		225～3,200kW	450～6,400kW
入　力	電　圧	3.3kV±10％　三相	6.6kV±10％　三相
	周波数	50/60Hz±5％	
出　力	電　圧	3.3kV　三相	6.6kV　三相
	周波数	0.2～60Hz　分解能　0.1Hz	
コンバータ		36相ダイオードコンバータ	
インバータ		マルチレベルインバータ直列接続PWM制御	
回転速度制御方式		簡易センサレスベクトル制御付V/f一定制御 精度：±0.5％	
効　率		約97％	
力　率		95％以上	
瞬停保護時限		200ms	
入力電流高調波含有率		ガイドライン以下	
盤構造		屋内自立閉鎖形（IP20）	
冷却方式		強制風冷	
オプション機能など			
	絶縁耐力	3号A・B対応	6号A・B対応
	瞬停保護時限延長	500msまで	
	出力サージ電圧抑制	ピーク電圧を定格の10％以下に抑制	
	投入・解列機能	商用↔インバータの同期切換	

図3　PMモータの回転子強度解析例



3.2　電力変換機器

上下水道プラントにおいて電源の供給信頼性を阻害する要因の一つは停電で，電力系統への雷撃により避雷器が動作する際に生ずる0.5秒以下の瞬時電圧低下から地震，台風などによる配電網の損壊が原因の数日間の長期停電まである。

また，最近の制御回路には小型のCPUを内蔵する制御機器が導入されIT化されてきており，電圧の変動が制御動作に影響を与え，設備の稼動に影響を与える可能性も増大してきている。

さらに分散化電源の普及が進めば，特に太陽光発電設備や風力発電設備のように天候により変動するものは系統の電力品質維持の阻害要因となる可能性もあり，これらの影響を極力抑制し，施設の安定的運転を確保することがます

図4　PMモータの磁束密度解析例

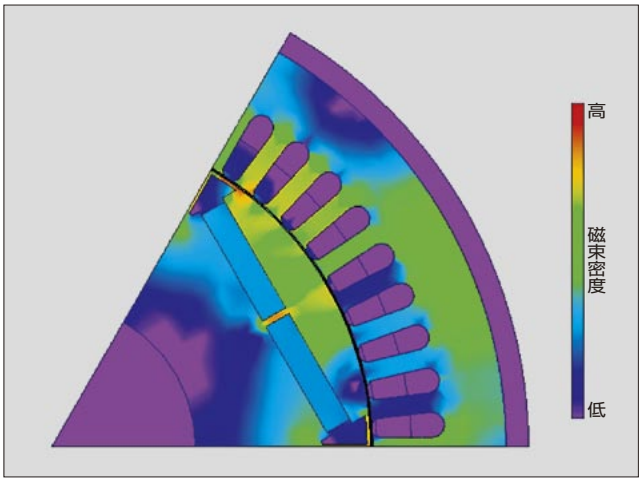


表3　PMモータの概略仕様

項　目	仕　様
回転子形状	磁石埋込み式（IPM）
出力範囲	90～500kW
回転速度	1,800r/min，1,500r/min，1,200r/min
電　　圧	200V級（90kW以下），400V級
過負荷耐量	150％　1分間
保護方式	IP44（全閉防まつ形）
冷却方式	IC416（外被表面冷却・他力形）
絶縁種別	F種

図 5　電力貯蔵のシステム構成

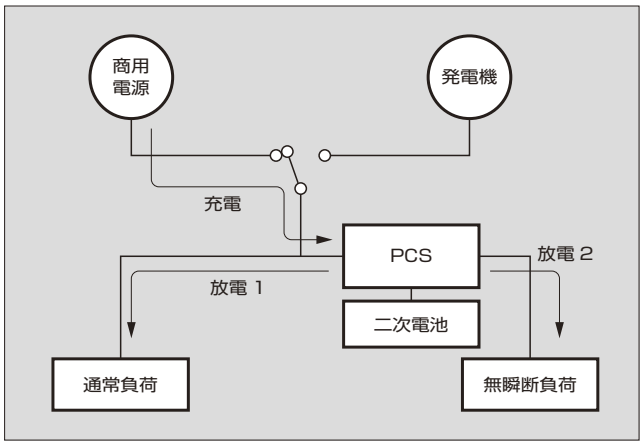


表 4　PCSの仕様例

項　目			仕　様
変換方式			自励電圧形高周波PWM
冷却方式			強制空冷
直流入出力	充　　電	電力	0～500kW
		電圧	580～755V
	放　　電	電力	0～538kW
		電圧	490～660V
交流入出力	電　　力	充電	400V，600kW
		放電	400V，500kW
	電圧変動範囲	連系	±10%
		自立	±2%
	周波数変動範囲	連系	±1%
		自立	±0.1%
	高調波含有率		総合5%，各次3%以下
	波形ひずみ率		3%以内
	力　　率		95%以上
変換効率			93%以上
切換時間			20ms以内

ます重要となっている。

ここでは，長時間の電力品質補償装置の例としてナトリウム-硫黄（NAS）電池やサイクル寿命を向上させた鉛電池を二次電池として使う電力貯蔵装置について紹介する。

二次電池を用いた電力貯蔵装置は**図 5** に示すシステム構成で，通常時には PCS（Power Conditioning System）を介して連系運転を行って二次電池に電力を貯蔵するとともに，エネルギーの一部を受電電力のピークカットに使用し，良品質の電力を負荷に供給する機能を持っている（放電 1，放電 2）。また，いったん停電となれば，即時に PCS を商用系統から解列して自立運転に入り，無瞬断で二次電池に貯蔵していたエネルギーで電力供給を継続することができ（放電 2），復電時も商用電源と同期を取りながら連系運転に無瞬断で復帰できる。

図 6　停電・復電時の PCS 入出力電圧波形

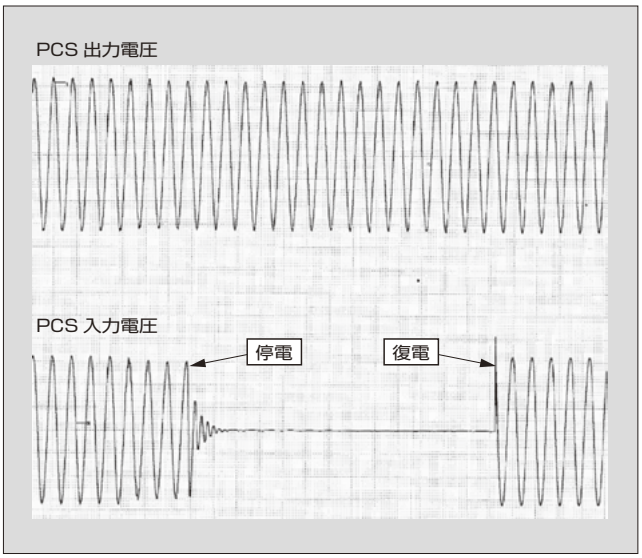


表 4 に PCS の仕様例，**図 6** に停電・復電時の PCS 入出力電圧波形を示す。

二次電池はサイクル放電に適し大容量化が容易な NAS 電池が主に用いられているが，サイクル放電用鉛蓄電池は小容量電力補償用，リチウムイオン電池，ニッケルメタルハイドライド電池は分オーダー，電気二重層キャパシタは百分の 1 秒オーダーの瞬時電圧低下補償用といった二次電池の充放電特性や補償時間適性に合わせた電力貯蔵システムを構成することも可能である。

現在開発中の発電機との連系，さらに無効電力や高調波電流などへの補償対象の拡大により，多様な電力品質補償に適用することができる。

4　あとがき

本稿では上下水道事業体の省エネルギーに関し，エネルギーマネジメントとパワーエレクトロニクス技術について紹介した。省エネルギー，環境負荷低減への取組みは今後ますます重要になっていくことが考えられ，富士電機もこれらの課題に応えることで，環境負荷低減に寄与していく所存である。

参考文献

(1)　小林憲徳ほか．「GENESEED solution」省エネルギーシミュレータ．富士時報．vol.79, no.6, 2006, p.477-480.

(2)　山田達也，佐藤和久．マトリックスコンバータ（FRENIC-MX）の開発．電機．2006-8. p.30-31.

(3)　玉井康寛ほか．マトリックスコンバータの過変調領域における一制御手法．平成 18 年電気学会産業応用部門大会論文誌．PpI-79-84.

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。