

スマートエネルギーネットワークと エネルギー最適化

進士 誉夫

地球環境問題が切実になるなか、再生可能エネルギーの導入が叫ばれているが、電力供給安定性に関する問題など、導入に伴うさまざまな問題が取りざたされている。コージェネレーションを用いたスマートエネルギーネットワークは再生可能エネルギーとうまく調和しながら、熱と電気を効率よく供給するシステムであるが、多様なエネルギー源から多様なエネルギー変換装置を用いて電気と熱を供給するので、従来よりも高度な最適化技術が必要である。今後、最適化手法の発展によりエネルギー制御技術への応用が期待される。

キーワード：分散形電源，コージェネレーション，再生可能エネルギー，省エネルギー，マイクログリッド，スマートグリッド

1. まえがき

二酸化炭素排出削減の対策として、太陽光発電の普及が進められている。我が国では太陽光発電（以下PV）の導入量を2030年には現在の約40倍にあたる5,300万kWの大量導入を目指している。しかし、太陽光などの再生可能エネルギーを利用した発電は、天候の影響などで出力が大きく変化するため、今後、電力系統に大量導入されると、系統周波数の維持や電圧上昇、余剰電力発生などの問題が発生する可能性がある。

東京ガス横浜研究所ではガスエンジン（以下GE）やPVなどによるスマートエネルギーネットワーク（以下SEN）を構築してガスエンジンによる太陽光発電の変動抑制や停電時のガスエンジンによる自立運転などの試験を行い、SENの価値とその可能性について検討を行っている。

2. ガス業界におけるSENの位置づけ

ガス業界においては今後2030～2050年にかけてCO₂排出量を削減すべく業界として、ガスビジョン2030を打ち出している。そのための方策は下記の6つである（図1）。

- ① 低炭素エネルギーの普及拡大
- ② 高効率利用機器・システムの開発・普及
- ③ 適材適所のエネルギー利用推進

④ 再生可能エネルギーを活用した地産地消システム

⑤ 都市部における面的・ネットワーク的エネルギー利用

⑥ ローカル水素ネットワーク社会への展開

上記のうちの④⑤を実現するものがSENであり、CO₂削減のため再生可能エネルギーを導入し、ガスコージェネレーションと調和させた上で面的な利用を推進することによって、高効率なシステムとするものである。なお、スマートグリッドに対してSENという言葉の意味合いは、電力のみならずコージェネレーションの廃熱なども含めた熱のネットワークも含めて「総合的な」エネルギーマネジメントを行うものである。

3. SENの3つの価値

東京ガスではSENが生み出す価値として下記の3

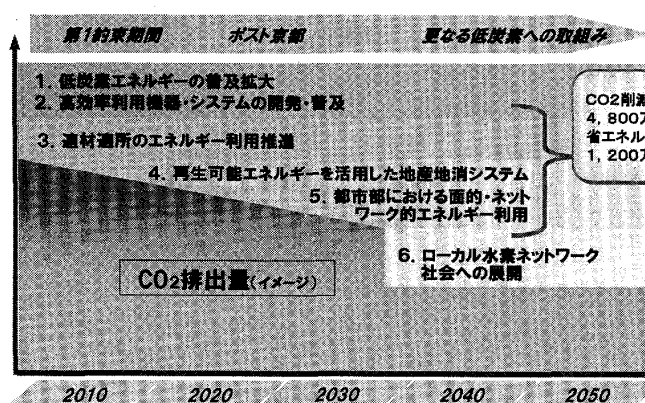


図1 ガスビジョン2030

しんじ たかお
東京ガス(株) スマートエネルギー技術センター
〒230-0045 横浜市鶴見区末広町1-7-7

つを想定しており、その価値の追求に向けて研究を行っている。

- ① エネルギー面的利用による省エネルギー、CO₂削減の推進
- ② 大規模電力系統との調和による分散形電源の系統貢献
- ③ 分散形電源自立運転による系統停電時のエネルギー確保

以下、これらの内容を解説する。

4. エネルギー面的利用による省エネルギー、CO₂削減の推進

従来は工場、ビルなどにおいて、おのおのの建物にて受電し、ガスの供給を受け、おのおのの建物の中の熱源機器によって空調を行っている（図2）。しかしながら、各建物の電力需要、熱需要の負荷パターンは異なるため、複数の建物を電力線、熱融通導管で接続し、電力・熱を融通すると合計の負荷パターンは平準化され電力需要、熱需要ともにフラットなものとなる（図3）。

これにより下記のような効果が期待できる。

- ① 負荷の平準化によるコージェネレーション、熱

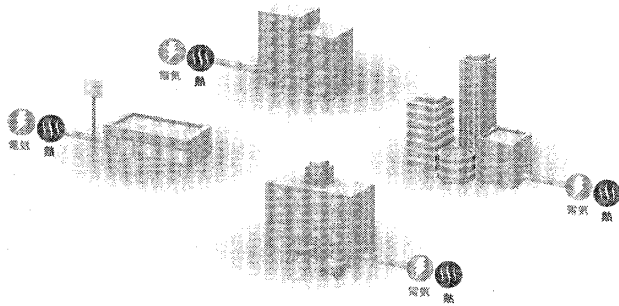


図2 従来のシステム

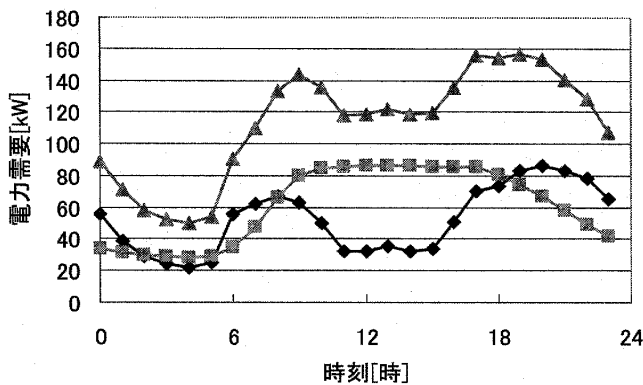


図3 負荷パターンの組合せ

源機器の稼働率・負荷率・寄与率の向上

- ② コージェネレーション、熱源機器の負荷率向上による効率の向上
- ③ 大型コージェネレーション導入による効率向上

5. 大規模電力系統との調和による分散型電源の系統貢献

コージェネレーションなどの分散形電源が太陽光発電などの再生可能エネルギーの導入影響を緩和すべく大規模電力系統と協調することにより、再生可能エネルギーを有効に利用することに下記のように貢献できる可能性がある。

5.1 系統低負荷時の再生可能エネルギー余剰電力の吸収

年末年始、ゴールデンウィークなど系統全体の負荷が小さいとき、電力系統では火力発電所を中心に出力を落とし、あるいは停止しその低負荷に応じた発電出力とする。原子力発電はほぼ負荷の大小にかかわらず、ほぼ一定出力で運転するので、相対的に火力発電の比率が低下する。

このような状態のとき、太陽光発電出力が大きくなると、火力発電は出力下限値に達してしまう可能性がある。これ以上太陽光発電の出力が上昇すると、電力系統の調整能力が不足し、健全な運用ができなくなる可能性がある。

このように太陽光発電出力が余剰になってしまう場合、コージェネレーションなどの分散形電源が運転されていれば出力抑制または停止することにより、余剰電力の解消ができCO₂排出量の少ない太陽光発電を有効に使用することに貢献できる。

ただし、この場合、分散形電源は下記のようなデメリットが生ずるので、これを保証するようなインセン

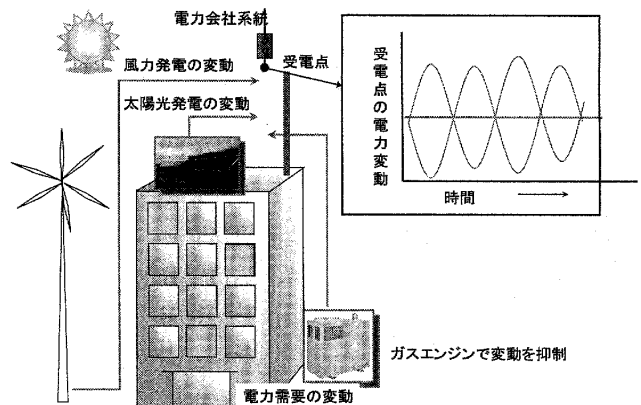


図4 再生可能エネルギーの変動抑制

タイプの検討が必要である。

- ① コージェネレーションの出力抑制または停止による発電機会の逸失
- ② コージェネレーションの出力抑制または停止による廃熱の不足

5.2 系統の周波数調整への貢献

再生可能エネルギーの増加により電力系統の調整力が減少すると同時に変動も大きくなることにより、周波数調整に影響が出る可能性がある。

コージェネレーションなどの分散形電源は起動停止が俊敏で応答速度も速いため周波数調整・需給調整に貢献できる可能性がある。具体的には図4のように再生可能エネルギーの変動をコージェネレーションの出力調整によって補完しその変動を吸収する。

この場合も分散形電源は下記のようなデメリットが生ずるので、これを保証するようなインセンティブの検討が必要である。

- ① 出力調整により部分負荷運転を余儀なくされることによる効率の低下
- ② 出力調整を長時間行うことによる原動機の寿命に対する影響

5.3 低圧系統の電圧調整への貢献

低圧系統では太陽光発電の大量普及により、その逆潮流（需要家から電力系統に向かう潮流）のため系統の電圧が上昇してしまうことが懸念されている。

低圧系統の電圧は電気事業法により100V系では 101 ± 6 Vと決められているため、太陽光発電の逆潮流のため系統の電圧が107Vを超える場合、太陽光発電の出力抑制または停止する必要がある。しかしながら、これでは導入した太陽光発電を一部活用できないといわざるを得ない。

そこで、低圧系統に導入された家庭用燃料電池などの分散形電源のインバータで無効電力を吸収し、低圧系統の電圧を下げ、ひいては太陽光発電の出力を引き出すことに貢献できる可能性がある。

6. 分散型電源自立運転による系統停電時のエネルギー確保

我が国の電力供給信頼度は世界でもトップクラスであり、年間の平均停電時間は数分以下である。

しかしながら、電力供給信頼度が高く、停電をほとんど経験しないことに慣れているからこそ、停電時に「都市機能」が損なわれる可能性が大きいことも否めない事実である。

需要家近傍（オンサイト）に設置された分散形電源の自立運転（電力系統から切り離された状態での運転）により、万が一停電が生じた場合でも、電力の供給が可能となり、その廃熱が利用できれば熱の利用も可能となる。

SENでは単にコージェネレーションなどの分散形電源の自立運転を提唱するものではなく、複数のコージェネレーション、負荷群などを情報通信技術により結びつけ、より有機的な運用をすることによって、「地域として」運用でき、「防災拠点」として活用できるシステムを目指す。

7. SENにおけるエネルギー最適化の例

7.1 地域冷暖房コージェネレーションの最適計画

7.1.1 システム概要

地域冷暖房とは都市部においてボイラ、冷凍機などの熱源を地域冷暖房プラントに集中して設置し、そのプラントから熱配管にて各需要家に蒸気、冷水を送出し、各需要家の冷暖房を行うシステムである。各需要家に冷暖房機器が不要であり、大型の熱源機器により高効率で運転できることが特徴である。SENにおいてはその地域冷暖房プラントに供給熱源として、大出力のガスエンジンコージェネレーションシステムを導入し、蒸気、冷水に加え、電力を地域内の需要家に供給する。図5にガスエンジン（GE）コージェネレーションシステム、蒸気吸収式冷凍機（SAR）、電動ターボ冷凍機（TR）、ガスボイラ（GB）、排熱蒸気温水投入型吸収式冷凍機（SHAR）から構成される地冷プラントの構成と熱供給機器の効率を示す。

SENの対象エリアは、都内に実在する地域冷暖房供給エリアである。電力供給はそのエリアのうち66kVで受電している建物と、地域冷暖房プラント、エ

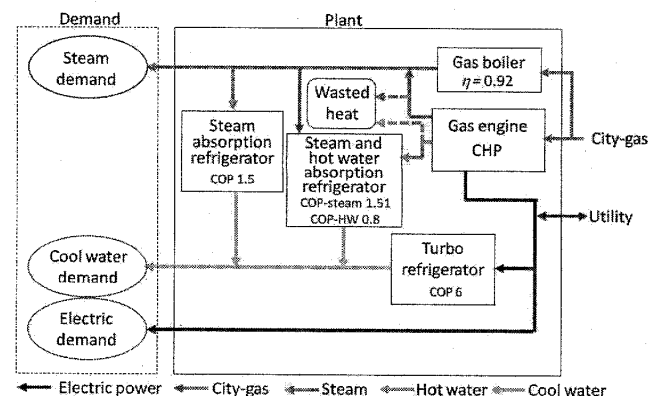


図5 システム構成

エネルギーセンターを含む再開発ビルを対象とする。熱供給は既存の熱配管を利用して、地域冷暖房エリア全体を対象とする。

7.1.2 機器特性・制約式・目的関数

このシステムを表1, 2に示す, エネルギー価格, 各機器の性能・効率などの条件を与えたうえで目的関数を最適化する。エネルギー価格は, 高騰した2008年7月現在の設定(ケースA, ケースB)と, 高騰以前の2007年夏の設定(ケースC)に分類した。

表1 エネルギー価格

Gas	Energy charge	Case C	45	JPY/Nm ³	
	U_{gas-ec}	Case A, B	65	JPY/Nm ³	
Utility electricity ⁸⁾	Demand charge U_{CD}		1,533	JPY/kW	
	Energy charge	On-peak	Case C	12.02	JPY/kWh
			Case A, B	13.75	JPY/kWh
		Shoulder (summer)	Case C	11.44	JPY/kWh
			Case A, B	13.17	JPY/kWh
		Shoulder	Case C	10.34	JPY/kWh
			Case A, B	12.07	JPY/kWh
	Off-peak	Case C	7.08	JPY/kWh	
		Case A, B	8.81	JPY/kWh	
	売電	On-peak	5.5	JPY/kWh	
Shoulder		4.95	JPY/kWh		
Off-peak		2.45	JPY/kWh		

On-peak(夏季 8:00-22:00)
Off-peak(22:00-8:00、休日・日曜)

表2 各制約条件

GE	出力規模制約 [kW]	2,000 - 5,200
	負荷率制約 ⁵⁾ [%]	50 - 100
	メンテナンス単価 ⁴⁾ , U_{mtm} [JPY/kWh]	2.5
	起動・停止にかかる単価 ⁴⁾ , U_{DGE} [JPY/kWh]	0.286
	Initial cost, $IC_{GE}(K_{GE})$	$-5.419[\text{JPY}/\text{kW}^2] \times K_{GE}^2 + 131,930[\text{JPY}/\text{kW}] \times K_{GE} + 3,488,087[\text{JPY}]$
	Duration period	15 years
SAR	Initial cost ⁴⁾ , $IC_{SAR}(K_{SAR})$	$51,136[\text{JPY}/\text{kW}] \times K_{SAR}$
	COP	1.5
	Duration period	15 years
SHAR	Initial cost $IC_{SHAR}(K_{SHAR})$	$53,000 [\text{JPY}/\text{kW}] \times K_{SHAR}$
	COP(Steam)	1.51
	COP(Hot water)	0.8
	Duration period	15 years
TR	Initial cost, $IC_{TR}(K_{TR})$	$57,054[\text{JPY}/\text{kW}] \times K_{TR} + 35,360,000[\text{JPY}]$
	COP	6
	Duration period	15 years
GB	Initial cost ⁴⁾ , $IC_{GB}(K_{GB})$	$28,409[\text{JPY}/\text{kW}] \times K_{GB}$
	COP(LHV 換算)	0.92
	Duration period	15 years
	Interest, i	3.0%

ガスエンジン(GE)、蒸気吸収式冷凍機(SAR)、電動ターボ冷凍機(TR)、ガスボイラ(GB)、排熱蒸気温水投入型吸収式冷凍機(SHAR)

目的関数はランニングコストおよび年価法による機器初期費用の合計とした。その結果, 一次エネルギー, CO₂排出量の変化を精査する。

7.1.3 最適化

目的関数を最小化する混合整数非線形計画問題(MINLP)を解くにあたり, GAMS (The General Algebraic Modeling System) のBARON ソルバーを用いた。また計算負荷を軽減するためにガスエンジンの台数について3~6台まで場合分けを行い, 各台数の場合ごとに最適機器容量導出計算を行った。

7.1.4 結果

表3に各ケースの設計結果を示す。

ケースBとケースCは5,200kW級ガスエンジンが3台導入されるという結果となり, ケースAでは5,200kW級が2台と2,500kW級が1台という結果になった。ガスエンジンの大きさに伴い, ガスエンジンからの排熱が小さくなるため, 蒸気・温水吸収式冷凍機の大きさがケースAでは小さく, ターボ冷凍機, 追いだき用のガスボイラ, 系統との契約電力が大きくなるという結果となった。運転パターンについては, ケースAは夜間の運転を止めて系統からの購入電力でまかなうパターンが選択されたが, ケースB, ケースCは夜間もコージェネレーションを動かし続ける運転となった。

また, これに伴い一次エネルギー, およびCO₂排出量は図6, 7のようになり, 従来の熱供給のみを行っていた地域冷暖房と比較して, ガスエンジンコージェネレーションを導入してSENを構成したことにより, 一次エネルギー, CO₂排出量ともに削減できることがわかる。

8. まとめ

今後, SENを構築し普及させることにより, 商用電力, ガス, 再生可能エネルギーなど多様な源から電力, 熱を生み出し, その目的関数もコスト, 一次エネルギー, CO₂排出量など多様になる。したがって,

表3 最適化の結果の設備容量

	Case A	Case B	Case C
GE	5,200kW×2 2,500kW×1	5,200kW×3	5,200kW×3
SAR	24,501 kW	23,658 kW	23,281 kW
SHAR	9,814 kW	12,381 kW	12,381 kW
TR	13,948 kW	12,224 kW	12,601 kW
GB	32,205 kW	31,685 kW	31,685 kW
Contract demand	9,977 kW	7,049 kW	7,109 kW

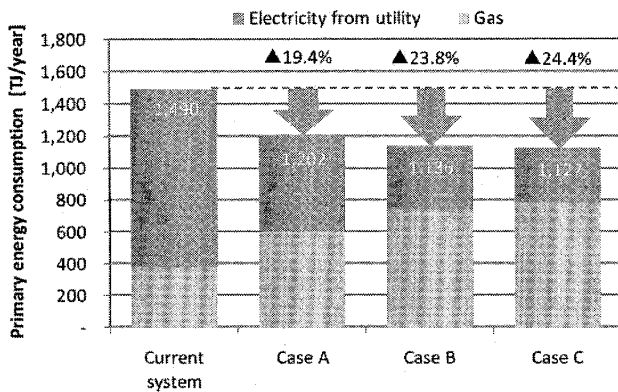


図6 一次エネルギー

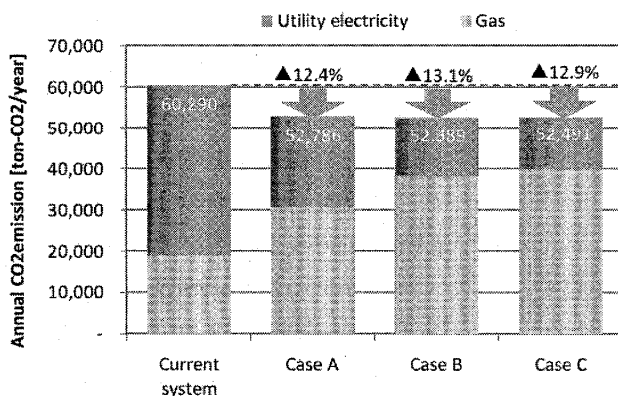


図7 CO₂ (電力のCO₂は全電源平均を用いた)

従来のエネルギーシステム以上に最適化計算が求められ、将来、市場の変化に応じた制御をリアルタイムで行うことによりさらなるパフォーマンスの向上が期待される場所である。

また、多くの測定したデータを扱うことにより、単に最適運用を追求するだけでなく、確率論的な考察、不確定要素に対するリスクヘッジなどが可能となる。

参考文献

- [1] 浅野浩志：ホロニックエネルギーシステム，日本機械学会誌，Vol. 108，No. 1045，pp. 946-947.
- [2] 緒方隆雄，辻田伸介，田上誠二，塚田龍也，徳本勉：東京ガスが目指すホロニックエネルギーシステムについて，電気学会電力系統技術研究会（2007年2月）.
- [3] S. Tagami, Y. Sasaki, T. Tsukada, T. Tokumoto, J. Ichimura, Y. Watanabe, H. Asano and S. Bando: Development and evaluation of microgrids islanded operation method with demand side control, 16th Power Systems Computation Conference (2008年7月).
- [4] 坂東茂，松崎勝久，浅野浩志，柳井崇，笹島賢一，木下守弘，沼田茂生，徳本勉，緒方隆雄：複数地冷地区のマイクログリッド化における事業性の検討，第17回日本エネルギー学会大会（2008年8月）.