



# エネルギー管理のための モデリングとシミュレーション ～ GEMS と HEMS の協調モデル～

林 泰弘\*

## Modeling and Simulation for Energy Management Using Integrated Simulation Model of Grid and Home EMS

Yasuhiro Hayashi\*

**Key words:** Energy Management, Grid EMS, Home EMS, Voltage Control, Demand Response

### 1. まえがき

2011年3月の東日本大震災の電力供給問題を契機に、再生可能エネルギーの固定価格買取制度(Feed-in Tariff)の導入(2012年7月)や日本卸電力取引所による分散型・グリーン売買市場の創設(2012年6月)が実施され、再生可能エネルギー導入拡大への期待が高まる一方、出力が不安定な太陽光発電(PV: Photovoltaics)や風力発電など再生可能エネルギーが配電系統へ大量導入すると、導入量や配電系統形態、負荷状況によっては電気事業法施行規則で規定されている適正電圧(101 ± 6 V)を維持できないことや、それに伴うPVの出力抑制が生じる恐れがある<sup>1)</sup>。

一方で、家庭やビルなど電力の消費地においても、震災以降、省エネや節電が定着しており、時間帯別電気料金など電力の契約メニューの多様化や前述のFITの導入などから、需要家の電力需給の振る舞いが多様化してきている。

Grid EMS (Energy Management System) は電力インフラのエネルギー管理であり、主として系統の電力品質

(電圧、周波数、安定度など)維持を目的としている。一方、HEMS (Home Energy Management System) は、主に省エネや電気料金の節約を目的としたエネルギー管理であり GEMS とは目的が異なっていることから、これまで目的に応じてそれぞれ別々に評価してきた。しかしながら、GEMS と HEMS はお互いに電氣的に繋がっており、個々の振る舞いが相互に影響を与える可能性がある。そのため、GEMS と HEMS のエネルギー管理効果を同時に評価できる一体化したモデルが必要であり、本来、そのようなモデルを用いて初めてエネルギー管理手法の開発や有効性の評価を実施できる。しかしながら、現状では GEMS と HEMS を同時に実装し、かつ評価できる数千軒規模の統一モデルはまだ構築されていない。

そこで本稿では、GEMS と HEMS が一つのエネルギーネットワークシステムとして協調動作する統一モデルを構築し、構築したモデルを用いて GEMS による電圧制御効果とデマンドレスポンス(DR: Demand Response)による HEMS の需要抑制効果の同時評価を実施する。

### 2. Grid EMS の評価手法

普及が顕著である太陽光発電の電力ネットワークへの連系上の主な課題としては、「配電系統における電圧上昇」、「周波数調整力の不足」が挙げられる。太陽光が急激に普及した際に全く対策を施さないと、コン

\* 早稲田大学 大学院先進理工学研究科電気・情報生命専攻教授、早稲田大学 先進グリッド技術研究所 所長  
Waseda University Research Institute for Advanced Network Technology, Waseda University Graduate School of Advanced Science and Engineering Major in Electrical Engineering and Bioscience

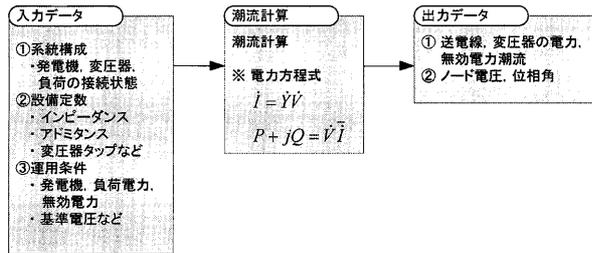


図1 潮流計算の流れ

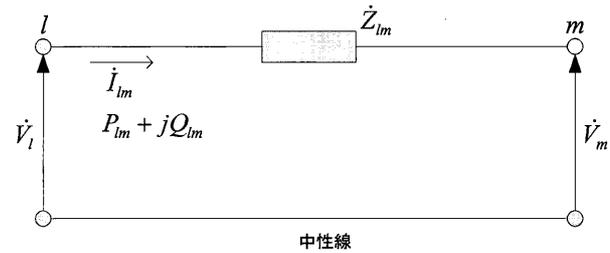


図2 ブランチの潮流

セントから使用する電気の品質である電圧と周波数が適正範囲を逸脱してしまうことになり、家庭内の機器が正常に動作しないだけでなく、広域停電を引き起こす恐れがある。住宅用太陽光発電の導入期には電圧逸脱問題が発生し、普及期には電圧逸脱問題に加えて周波数逸脱問題が生じる。これら再生可能エネルギーの導入限界評価には、一般的に電力潮流解析を用いる。

電力潮流解析は、電力系統設備をノード、ブランチで表し、与えられた条件での電力方程式を解いて、ノードの電圧、位相角、ブランチの有効潮流、無効潮流を求めるものである。潮流計算の流れを図1に示す。

$n$  ノードから成る系統については式(1)が成立する。

$$P_i + jQ_i = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_i V_j \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$\begin{cases} \bar{Y}_{ij}: \text{ノード } i, j \text{ の伝達アドミタンス} \\ \bar{V}_i: \text{ノード } i \text{ の電圧} \end{cases}$$

ここで、

$$Y_{ij} = Y_{ij} \varepsilon^{j\theta_{ij}}, \quad V_i = V_i \varepsilon^{j\delta_i}, \quad V_j = V_j \varepsilon^{j\delta_j}$$

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j \quad \delta: \text{受電端位相角}$$

とおけば、式(1)は、

$$P_i + jQ_i = \sum_{j=1}^n (Y_{ij} \varepsilon^{-j\theta_{ij}}) (V_i \varepsilon^{j\delta_i}) (V_j \varepsilon^{-j\delta_j})$$

$$= \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_i V_j \varepsilon^{j(\delta_{ij} - \theta_{ij})} \quad (2)$$

$$= \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_i V_j (\cos(\delta_{ij} - \theta_{ij}) - j \sin(\delta_{ij} - \theta_{ij}))$$

となる。従って、

$$P_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_i V_j \cos(\delta_{ij} - \theta_{ij}) \quad (3)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_i V_j \sin(\delta_{ij} - \theta_{ij})$$

式(3)が  $n$  ノードの電力方程式となる。

方程式の数は  $2n$  個で、 $(P_1, Q_1, V_1, \delta_1), \dots, (P_n, Q_n, V_n, \delta_n)$  の  $4n$  個の変数を含むため、 $2n$  個の変数の値を指定すれば、残りは式(3)により一義的に定まる。

通常、基準となるノードについては  $V$  と  $\delta$  を、他のノードについては  $P$  と  $Q$  と  $V$  を与えるノードを PV 指定ノードという。各ノード電圧の大きさと位相角が求められれば、ブランチの潮流は求められる。

例えば、ノード  $l$  と  $m$  とを結ぶブランチの潮流  $P_{lm} + jQ_{lm}$  は式(4)によって求められる。

$$P_{lm} + jQ_{lm} = \dot{V}_{lm} \bar{I}_{lm} = V_l (\bar{V}_l - \bar{V}_m) / \bar{Z}_{lm} \quad (4)$$

$\bar{Z}_{lm}$ : ノードと  $l$  と  $m$  を結ぶブランチのインピーダンス

$\dot{I}_{lm}$ :  $\bar{Z}_{lm}$  の電流

$P_{lm} + jQ_{lm}$ :  $\bar{Z}_{lm}$  のノード  $l$  側の有効電力、無効電潮流

なお、電力方程式は非線形方程式であるため、これを解くには、未知数に適当な初期値を設定して、電力方程式から近似解を求め、さらにこれを電力方程式に代入して、より精度の高い近似解を反復計算法により実施する必要がある。この反復計算方法には、一般的にニュートンラフソン法等を用いる<sup>2)</sup>。

### 3. 配電システムのモデル化

#### 3.1 6.6 kV 高圧配電システムのモデル化

6.6 kV 高圧配電システムは、配電用変電所から需要家の近傍までの電力流通経路であり、電気の需要が発生するたびに線路を延伸してきたため、配電システムは変電所を中心とする放射状の形態をしていることから、一般的な意味での標準配電モデルというものはない。そこで、本研究では、電気協同研究第66巻第1号「配電システムにおける力率問題とその対応」(以降、電協研<sup>3)</sup>)における全国の電力会社の実系統223配電線を対象とした調査、測定を基に、表1に示す様に「工業」、「繁華街」、「住宅」、「農山村」の4つに分類した。

同じ地区区分でも、線路巨長や負荷分布により計算

表 1 配電システムモデル

地区区分	モデル	線路巨長		重負荷	負荷比	変圧器数	SVR
		幹線	分岐線	軽負荷	高压: 低压		
工業地区	平均	3.8 km	0.2 km	2220 kW	1:0.07	8	0
	過酷	18.4 km	5.5 km	833 kW	1:0.95	62	3
住宅地区	平均	3.0 km	4.3 km	2113 kW	1:1.37	70	0
	過酷	6.1 km	3.7 km	1132 kW	1:0.80	54	1
繁華街地区	平均	1.2 km	0.5 km	1677 kW	1:0	0	0
	過酷	2.8 km	1.9 km	631 kW	1:3.44	75	0
農山村地区	平均	7.6 km	1.8 km	1547 kW	1:0.51	30	1
	過酷	6.2 km	2.2 km	823 kW	1:0.09	7	0

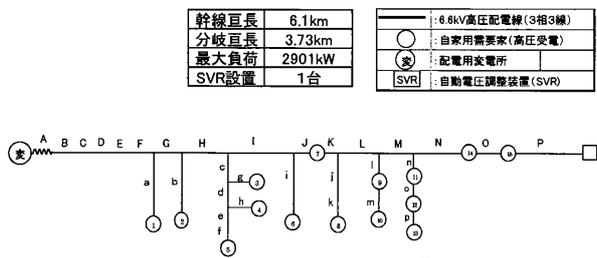


図 3 配電線モデルの一例(住宅過酷モデル)

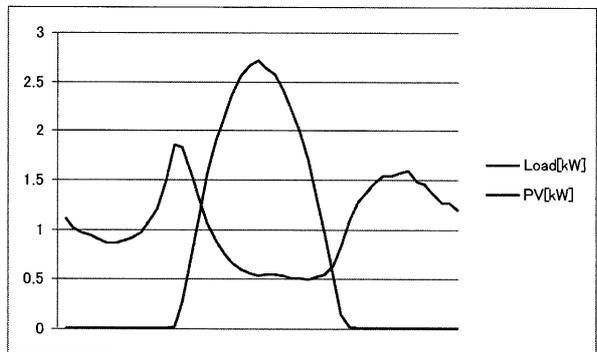


図 4 1日のPV出力, 負荷特性(実測平均値)

条件が大きく変わることから、地区区別の平均値とほぼ同等のモデル(平均モデル)および負荷電流や線路巨長が長く電圧変動計算上厳しいと考えられるモデル(過酷モデル)について、4地区区分(「工業」,「繁華街」,「住宅」,「農山村」)×2モデル(平均モデル, 過酷モデル) = 8モデルを構築した。図3にその一例として住宅過酷モデルを示す。

### 3.2 低圧配電系統およびPV(太陽光発電)のモデル化

電協研における低圧配電線の力率の実測結果はほぼ100%であったため、低圧負荷は有効分のみで模擬した。これを配電線の線路(幹線, 枝線)に均等分布する

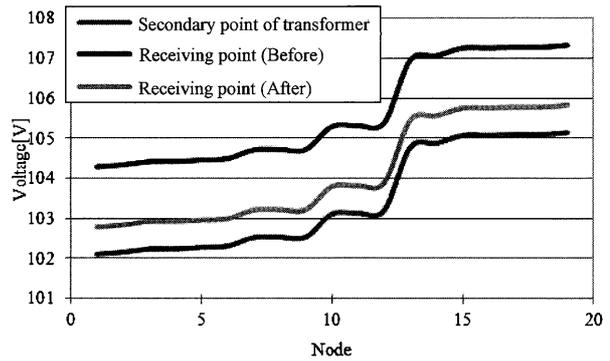


図 5 住宅過酷モデルにおける電圧分布(PV100%)

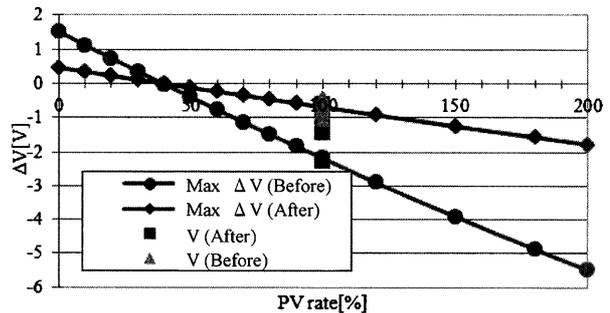


図 6 低圧系統の電圧改善効果

ものとして線路長に応じた負荷の割り当てを行った。

PVの連系量は、図4に示す過去の実測結果の平均値を用いて、負荷とPV出力の比から算出(軽負荷時は、PV/負荷 = 1.8553, 重負荷時 = 0.00568)し、PV連系量を均等分布におけるパラメータとして算出した。

### 3.3 低圧系統細分化, 太線化によるPV導入限界量拡大

PVの導入の課題の一つとして、逆潮流による系統電圧上昇及びそれに伴うPVの出力抑制が挙げられる。本稿では実際に電気事業者で実施されている低圧系統での電圧上昇抑制を目的とした柱上変圧器細分化, 配電線太線化を対策として実施した際のPV導入量拡大を定量的に検証した。低圧側での電圧変動において過酷地点となる柱上変圧器直下(近端: Secondary point of transformer)と最も柱上変圧器から遠い受電点(遠端: Receiving point)について解析を実施した。まず軽負荷時において、PV/負荷 = 1.8553をPV導入率100%(モデル内の低圧負荷全てにPVを導入)とし、作成した各モデルにPV導入量をパラメータとしてPV導入限界量の算出結果(PV導入率100%の際の変圧器直下および受電点の電圧分布)を図5に示す。図5ではPVによる逆潮流のため、対策前の遠端電圧が上限逸脱を起こしている。PV導入量が拡大し、低圧系統内の発

電量が負荷よりも上回る場合、電流は住宅側から柱上変圧器の方向へ流れ、低圧線と引き込み線のインピーダンスにより電位上昇が生じることから、特に遠端側での上限逸脱が発生している。この対策として電力会社では、低圧系統のインピーダンスの減少を目的とした柱上変圧器細分化や配電線太線化を実施しており、**図 6** に対策の前後における PV 導入率毎の低圧側の電位変動(近端電圧 - 遠端電圧)の潮流計算結果を示す。PV 導入率が 40% を超えると低圧系統で逆潮流が生じており、これら低圧側の対策を施すことで PV 導入率 100% において約 1.5 V 程度の改善が見込まれ、導入率が増加すると更なる効果が期待できる。

同様の検証を地区区分ごとに構築した 8 モデルに対して実施し、対策前後における PV 導入量拡大の効果を **表 2** に示す。8 モデル中、5 モデルは PV100% でも適正電圧逸脱は生じなかった。逸脱した 3 モデルの内、住宅過酷、農山村過酷モデルでは低圧側の対策により PV 導入限界量が拡大し、特に農山村過酷モデルでは最大 PV 導入率が 70% 増(80%→150%)となり、大幅な改善効果が確認できた。一方で工業過酷モデルにおいては改善効果が得られなかった。これは、該当配電モデルの幹線巨長が 18.4 km と長く、自動電圧調整装置 SVR も 3 台設置されており、逆潮流により高圧側で既に SVR の上限値に張り付いていたためであり、低圧側の対策だけでは PV 導入量拡大は難しいと考えられる。このようなケースや更なる PV 導入量拡大には高圧側での対策との連携が重要であると考えられる。

#### 4. GEMS と HEMS の協調シミュレーション

本章では、GEMS と HEMS の協調シミュレーションとして、GEMS の電圧制御効果と HEMS の需要抑制効果を検証する。HEMS の需要抑制としては、負荷シフトを扱う。負荷シフトは負荷需要がピークとなる

表 2 モデル毎の PV 導入限度

地区区分	モデル	PV 導入限度 [%] (対策前)	PV 導入限度 [%] (対策後)
工業地区	平均	100<	---
	過酷	20	20(+0)
住宅地区	平均	100<	---
	過酷	90	130(+40)
繁華街地区	平均	低圧負荷無し	
	過酷	100<	---
農山村地区	平均	100<	---
	過酷	80	150(+70)

時間帯に電力インフラが需要家に需要抑制を要請し、要請に応じた需要家が抑制した負荷を夜間にシフトすることで負荷需要のピークを緩和することである。このような負荷シフトは、需給バランス面で非常に効果的である一方、PV による余剰電力の増加に伴う系統電圧の上昇や夜間への集中負荷に伴う電圧降下を発生させ、系統電圧を適正範囲から逸脱させてしまうといった電力品質面での問題を引き起こす可能性がある。そのため、それぞれのエネルギー管理手法を確立するだけでなく、GEMS による電圧制御と HEMS による需要抑制とを同時に検証・評価しなければならない。

そこで本稿では、GEMS と HEMS とを一体化した統一シミュレーションモデルを構築し、そのモデル上で需要抑制シミュレーションと電圧制御シミュレーションを同時に実施することにより、GEMS と HEMS とが一つのエネルギーネットワークシステムとして協調運用するエネルギー管理手法の評価を行う。

##### 4.1 GEMS による電圧制御手法

配電系統の電圧制御は、主に LRT (Load Ratio control Transformer)、SVR (Step Voltage regulator) などの電圧制御機器のタップ制御により行われており、本稿では、電圧制御方式として、配電系統に設置されたセンサ内蔵開閉器の計測情報を活用した集中型電圧制御手法を採用し、柱上変圧器の 2 次側電圧が基準電圧に近付くように電圧制御器(LRT, SVR)にタップ指令を与える。具体的には、まず計測電圧の最大値と最小値の平均値と基準電圧との偏差  $V_c$  を算出し、基準電圧  $V_{ref}$  の制御不感帯  $\varepsilon$  からの逸脱積分量を求める。そして、不感帯逸脱積分値  $F$  がある基準値  $F_{ref}$  に達した場合に、タップ切替指令  $\Delta Tap$  を与える。なお、低圧系統の最大電圧降下を 6 V (本線: 3 V, 引込み線: 3 V) と見積もり、基準電圧を 101 V に設定した。

$$V_c = (\max\{V(n)\} + \min\{V(n)\}) / 2 - V_{ref} \quad (n = 1, 2, \dots, N)$$

$$F = \int \text{sign}(V_c) \cdot (V_c - \varepsilon) dt \quad (5)$$

$$\Delta tap = \begin{cases} +1 (F < -F_{ref}) \\ 0 (|F| < F_{ref}) \\ -1 (F > F_{ref}) \end{cases}$$

$N$ : センサ内臓開閉器数

##### 4.2 HEMS における負荷シフト

負荷シフトは DR に期待される効果の 1 つであり、負荷需要がピークとなる時間帯に需要を抑制し、抑制した負荷を夜間にシフトすることで負荷需要のピーク

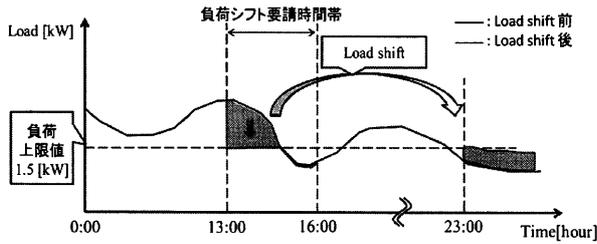
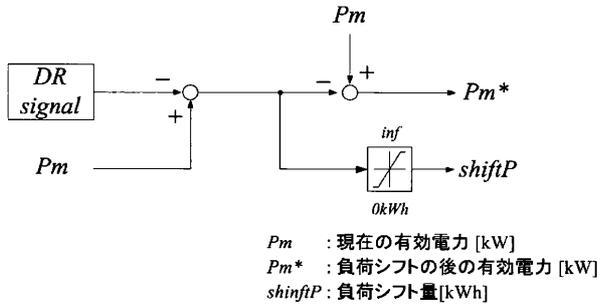
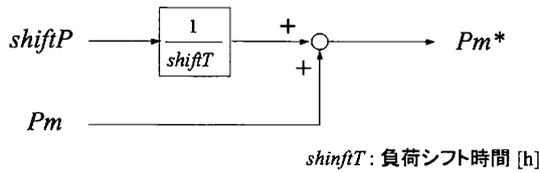


図7 低圧需要家の負荷シフトのイメージ



(a) ピーク時間帯の負荷抑制ロジック



(b) 夜間時間帯の負荷シフトモデル

図8 低圧需要家の負荷シフトの制御モデル

を緩和できる。

本稿では、低圧需要家と高圧需要家のそれぞれに負荷抑制の要請を出し、要請を受けた需要家は抑制依頼に必ず応答するものとした。現状、負荷抑制量やシフト量は定められた基準がないため、低圧需要家へは負荷使用量を 1.5 kW、高圧需要家に対しては 10% の負荷抑制を要請することとした。なお、高圧需要家は需要抑制のみで夜間へのシフトはなく、低圧需要家において抑制依頼電力値よりも現在の消費電力が下回る場合には負荷電力の抑制は行わず、現状を維持できるものとしている。図7と図8に負荷シフトのイメージと制御ロジックをそれぞれ示す。

### 4.3 協調シミュレーション

構築した GEMS と HEMS の統一シミュレーションモデルにおいて、まず、これまで行われてきたように、GEMS と HEMS とを切り離して開発したエネルギー管理手法を適用し、HEMS の需要抑制が GEMS の電圧制御に与える影響を評価する。次に、GEMS による電圧制御シミュレーションと HEMS による需要抑制シミュレーションを同時に実施し、GEMS と HEMS

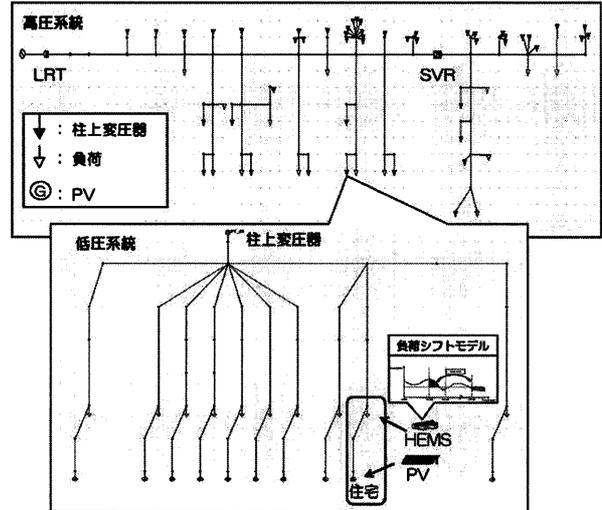


図9 GEMS と HEMS の統一シミュレーションモデル

表3 シミュレーション設定値

	設定値
シミュレーション時間	7:00～翌日 7:00 (10 秒刻み 8640 断面)
負荷抑制時間	13:00～16:00
負荷シフト時間 (低圧需要家のみ)	23:00～2:00
高圧需要家への負荷抑制要請量 (負荷電力 100 kW 以上)	10%
低圧需要家への負荷抑制要請量	1.5 kW

表4 HEMS が GEMS に与える影響

負荷抑制量 [kWh]	888.6
高圧負荷抑制量 [kWh] および応答需要家数	446.9 4(全 14 軒)
低圧シフト量 [kWh] および応答需要家数	205.7 308(全 479 軒)
需要抑制による 高圧系統での最大電圧上昇 [V]	20.8
負荷シフトによる 高圧系統での最大電圧上昇 [V]	13.6
需要抑制による 低圧系統での最大電圧上昇 [V]	3.10
負荷シフトによる 低圧系統での最大電圧降下 [V]	1.30

とが協調運用するエネルギー管理手法の評価を行う。

#### 4.3.1 協調シミュレーションの条件

図9に構築した GEMS と HEMS の統一シミュレーションモデルを示す。統一モデルは、図3に示した住宅過酷モデルの高圧系統と低圧系統を詳細に模擬し、低圧需要家および PV 出力を実測データに変更した。低圧需要家総数は 479 軒であり、全ての低圧需要家に PV が導入されている。1 軒当たりの平均定格出力は 2.71 kW であり、表3にシミュレーション設定値を示

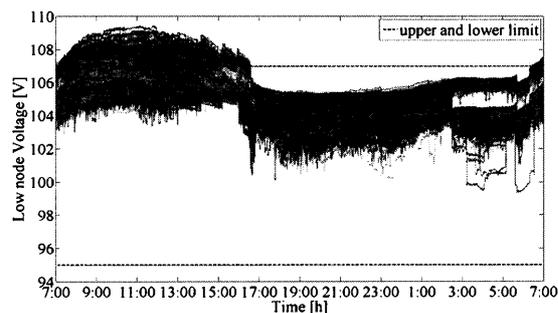


図 10 GEMS と HEMS を独立してシミュレーションした際の低圧受電点の電圧分布

す。HEMS の制御モデルは全ての需要家に組み込んでおり、GEMS の電圧制御手法は電圧制御機器である LRT と SVR にそれぞれ組み込んでいる。

#### 4.3.2 協調シミュレーション結果

表 4 に統一モデルにおける HEMS の需要抑制効果と HEMS が GEMS に電圧面で与える影響を示し、図 10 に GEMS と HEMS がそれぞれ独立してエネルギー管理を行った際の低圧需要家受電点の電圧分布を示す。表 4、図 10 から、今回の統一モデルにおいて、約 29% の高圧需要家と約 64% の低圧需要家が需要抑制に応答し、配電系統全体での日中の負荷抑制量は 889 kWh と十分な需要抑制効果が得られている。しかしながら、PV 逆潮流の増加に伴う電圧上昇が顕著化し、需要家の受電点電圧が適正値である 107 V を上回る結果となり、電圧面での問題が見られた。このような場合、受電点電圧を適正電圧内に維持するためには PV 発電の抑制を行わなければならない。

一方、GEMS と HEMS が協調動作するシミュレーションによる受電点電圧の電圧分布を図 11 に示す。GEMS と HEMS が協調動作するシミュレーションにより、HEMS の振る舞いを捉えて GEMS が電圧制御を行っており、全ての受電点電圧を適正電圧範囲内に維持できていることが分かる。また、適正上下限值からの電圧裕度も高いため、更なる PV 導入量の拡大も可能である。この結果から、GEMS と HEMS とを統一したモデルにおいて、最大需要の適切な抑制、かつ、PV 発電の抑制を行わずに適正電圧を維持できる協調エネルギー管理手法の有効性の評価と検証が実現できたことがわかる。

## 5. おわりに

本稿では、電力インフラでのエネルギー管理である GEMS と家庭でのエネルギー管理である HEMS とを

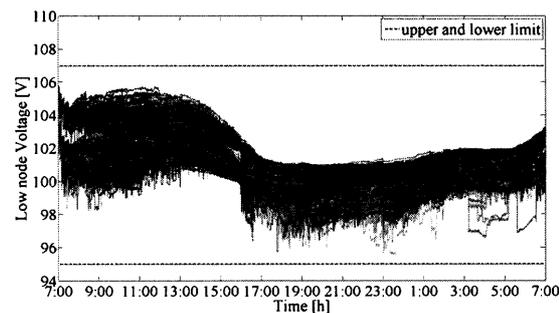


図 11 GEMS と HEMS の協調シミュレーションによる低圧受電点の電圧分布

一体化したモデルを構築した。GEMS と HEMS はこれまで切り離されてモデリングされてきたため、一体化したモデルを構築することはエネルギー管理の全体最適化の観点から極めて重要である。また、構築したモデルを活用し、PV 導入限界量の拡大のための電力インフラにおける対策や DR の一つである負荷シフトを HEMS に実装し、GEMS と HEMS が一つのエネルギーネットワークシステムとして協調動作する一連のシミュレーションを実施した。シミュレーション結果より、これまで行ってきたような個々の EMS による解析では得られなかった需要抑制効果と電圧制御効果の同時検証や評価が可能となることが確認できた。

今後は需要家に対して電気料金や様々なオプションを通じたインセンティブが与えられ、DR や太陽光発電からの逆潮流等の双方向のエネルギーのやり取りが頻繁に行われることが予想される。本稿で構築した GEMS と HEMS とが協調運用可能なエネルギー管理のシミュレーションモデルの役割が今後益々重要になってくると思われる。

最後に、本稿を執筆するにあたり、ご協力をして頂いた早稲田大学 先進グリッド技術研究所の吉永淳氏および先進理工学研究科博士後期課程の芳澤信哉君に謝意を示す。

## 参考文献

- 1) 林 泰弘：再生可能エネルギー電源との調和に向けた先進グリッド技術の国内動向，電学論 B, 130-11, 928/931 (2010)
- 2) 新田目倅造：電力系統技術計算の基礎，電気書院，(1981)
- 3) 一般社団法人 電気協同研究会：電気協同研究 配電系統における力率問題とその対応，66-1, (2010)
- 4) 林 泰弘：分散型電源の導入拡大に対応した配電系統電圧制御の動向と展望，電学論 B, 129-4, 491/494 (2009)