

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560353

研究課題名(和文)震災時に強いスマートグリッドによる電力給電システムの構築

研究課題名(英文)Construction of Power Supply System by Strong Smart Grid at Earthquake

研究代表者

一柳 勝宏 (Ichiyangi, Katsuhiro)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：80064955

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：配電網のスマートグリッド構成により、新エネルギー利用と燃料電池の蓄電機能のメリットを考慮して、緊急災害時における孤立地域の電力の自給機能と平常時のエコ電力供給のための送配電システムの運用、制御法を開発、実証検討した。自然エネルギー利用に関して、風力、太陽光、水力エネルギーの予測手法を開発し、風力/太陽エネルギーを総合的に予測し、自然エネルギー発電・水素製造・燃料電池からなるネットワーク化により系統連系されたスマートグリッド構築し、各分散電源の協調運転により平常時および災害時に安定運転可能な手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：By taking into account of the benefits of new energy utilization and fuel cell power storage function, smart grid of the distribution network has been built. Therefore, operation and control method of a power transmission and distribution systems for the eco-power supply during normal operation and the power autonomous operation of an isolated region in the emergency disaster have been developed and verified.

With respect to use of natural energy, to develop wind, solar, the prediction method of hydroelectric energy, was comprehensively predict the wind/solar energy. We have configured the smart grid, which is grid-connected by a network of which consists of natural energy power generation, hydrogen production and fuel cells. In addition, we have developed a stable operation technique in cases of normal times and disasters by coordinated operation of each distributed power.

研究分野：電力システム工学，電力工学

キーワード：燃料電池 水素製造 太陽光発電 雲画像 日射強度 予測 スマートグリッド エコ電力

1. 研究開始当初の背景

予想を上回る震災が東日本地域を襲い、ライフラインの早期復旧が課題となり、特に、災害時における電力のエネルギー供給やエネルギー自給が最も重要であり、他のインフラ設備(電話、ガス、水道)の早期復旧のためにも、電力エネルギーの確保が急務となった。他方、地球温暖化抑制のために、太陽光発電、風力発電などの再生可能エネルギー導入されると、これら出力のピーク時には、負荷側から系統側への逆潮流、電圧や周波数の変動による電力品質低下、線の線路容量超過など、余剰電力に対する多くの問題が発生するようになる。将来的にも、再生可能エネルギー普及による余剰電力対策と緊急時の安定電力供給の実現が急務である。このような状況において、最近の水素社会の普及により、燃料電池は通常の発電効率が40-45%(火力発電)に対し、70-80%の総合エネルギー変換効率が期待される。

本研究では、配電網のスマートグリッド構成により、新エネルギー利用と電気自動車などの蓄電機能や燃料電池利用の多くのメリットを考慮して、緊急災害時における孤立地域の電力の自給機能と平常時のエコ電力供給のための送配電システムの運用、制御法を開発、実証検討する。そこで、風力/太陽エネルギーを総合的に予測し、自然エネルギー発電・水素製造・燃料電池からなるネットワーク化により系統連系されたスマートグリッド構成にすると共に、各分散電源の協調運転により、平常時および災害時に安定運転可能な手法を開発する。

2. 研究の目的

太陽光発電・風力発電などの自然エネルギーに基づく発電設備を活用し、平常時のみならず、災害時における孤立地域の電力自給機能を確保し、ライフラインの早期復旧を実現できるスマートグリッドネットワークを実現しようとするものである。自然エネルギーによる発電電力を利用し、水を電気分解して得られる水素を貯蔵する。この水素に基づく燃料電池発電による安定電力供給を一つの手段として、平常時ならびに震災時に強いスマートグリッドネットワークの構築を目指す。

(1) 平常時のエコ電力の実現

昼間の余剰電力を水素としてエネルギー貯蔵し、夜間などの不足電力時に燃料電池発電の燃料として利用可能

(2) 緊急時の電力の安定供給の実現

水素ボンベに水素貯蔵し、常時、電力利用可能

(3) DC スマートグリッドの構築

平常時のエコ電力運転および災害時の電力自給を可能にするために再生可能エネルギーによる各種分散電源の協調運転の実現

(4) 自然エネルギーの予測利用

太陽光や水力などの自然エネルギー利用

による発電に関して、出力変化を精度良く予測することにより、平常時のエコ電力および緊急災害時の電力の安定供給可能

3. 研究の方法

(1) スマートグリッドの構築

太陽光発電(または風力発電)、二次電池(蓄電池)、燃料電池、さらに水素発生・水素貯蔵設備によるネットワーク構成によるスマートグリッドを構築した。

(2) DC グリッドシミュレータの試作

実際の水素を燃料とする発電装置(1000W燃料電池)、小容量蓄電池、水素発生器、水素ボンベにより構成したエネルギー貯蔵装置、および太陽光発電、一般負荷をDC連系したDCグリッドの模擬実験装置(DCグリッドシミュレータ)を試作し、余剰電力の有効利用と平常時のエコ電力および緊急災害時における電力の安定供給を実験的に検証した。

(3) 自然エネルギー予測

GPS時刻同期式全天空画像撮影装置を開発し、雲画像による日射強度の相関性検討、雲高および雲の移動状況の推定法、PV発電出力予測手法など、検証した。

4. 研究成果

(1) 平常時のエコ電力運用と緊急時の電力安定供給の実証試験

① DC マイクログリッドの構築

平常時の電力安定供給と災害時における電力の自給自足を可能にすることを目的として、小容量蓄電池(Battery)、水素発生器(HP)、燃料電池(FC)、水素ボンベにより構成したエネルギー貯蔵装置、およびPV発電(PV)、一般負荷(Load)からなるマイクログリッドシステムを構築した(図1)。

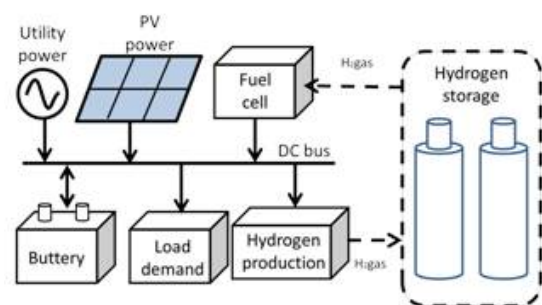


図1 水素発生/燃料電池発電によるスマートグリッドの構築

②電力変動成分の分離

各電源や負荷の電力変動周期を 30 分～1 時間を境にして、長周期成分と短周期成分とに分け、長周期変動分について最適運用計画を実施する。また、短周期変動分については蓄電池のみが担うものとした。これにより、比較的小容量の蓄電池により短周期成分の出力変動抑制が可能となる。

③システム運用計画

長周期変動成分の運用システムの関係式を次式で表す。

$$P'_{s_Load}(t) + P_{FC}(t) + P_{sys}(t) - P'_{Load}(t) - P_H(t) = 0 \quad (1)$$

ここで、 $P_{FC-H} = P_{FC} - P_H$

$$P'_{s_Load}(t) = P'_{Sun}(t) - P'_{Load}(t)$$

$P'_{sun}(t)$ は PV 発電出力、 $P'_{Load}(t)$ は負荷需要電力の長周期成分、 $P_{FC}(t)$ は燃料電池発電、 $P_H(t)$ は水素製造消費電力、 $P_{sys}(t)$ は商用系統連系電力商用系統電力の変動を抑制することを目的として次式の最小化を図った。

$$J = \int_0^{24} \left(P_{SYS}(t) - \bar{P}_{SYS} \right)^2 dt \quad (2)$$

$$\bar{P}_{SYS} = \frac{1}{24} \int_0^{24} P_{SYS}(t) dt \quad (3)$$

目的関数 J を最小化することにより、商用変動を最小化することにより、水素発生器と燃料電池の制御方針が決定する。

④シミュレータの構成要素

本研究に用いたマイクログリッドシミュレータの主な構成要素を表 1 に示す。

表 1 マイクログリッドシミュレータ構成要素

燃料電池	
直流電圧	66-45V
出力電力	1kW
水素貯蔵装置	
ボンベ容量	1ℓ
太陽光発電装置	
出力電力	0.5kW
水素製造装置	
水素製造能力	2 ℓ/min/kW
消費電力	0.36kW
蓄電池	
直流電圧	24V
容量	9Ah
SOC(充電率)	70%

⑤実証試験結果

キャンパス内 12 号館屋上の PV 装置による発電出力および同建屋における電力需要の実測データを用いて、商用との連系線電力の変動抑制を目的としたシミュレーションを

実施した。晴れ→曇り→晴れへの天気の変換時、PV 出力が急激に変化するケースを取り上げ、図 2 に示すパターンを使用した。また、負荷需要は 12 号館の電力需要カーブを用い、

前期の平日負荷として同図に併記している。実測される諸量を用いて、商用電力の変動を抑制することを目的とした(2)式の最小化を図った。計算機シミュレーションおよび模擬実験(実規模縮尺 1/10)を実施した。その結果を図 3 および図 4 の (a)、(b) に各々示す。これらの図から、シミュレーションと実験結果がほぼ一致し、水素製造と燃料電池の協調制御により商用電力の変動抑制効果が確認できる。

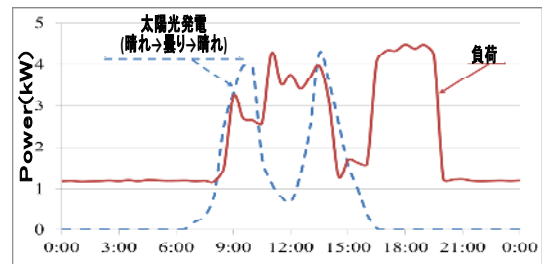
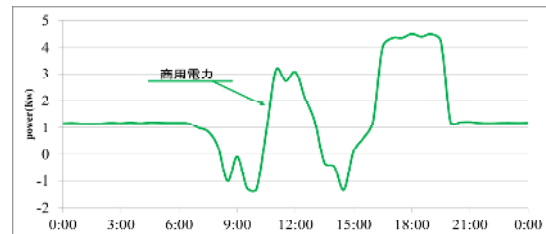


図 2 シミュレーションに用いた PV 発電出力と負荷需要電力



(a) 水素製造/燃料電池の協調制御した場合 (商用電力は変動少なく、ピークも小さい)



(b) 水素製造/燃料電池を使用しない場合 (商用電力は大きく動揺し、ピークも大きい)

図 3 商用電力変動抑制効果のシミュレーション結果

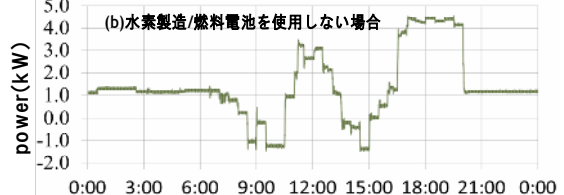
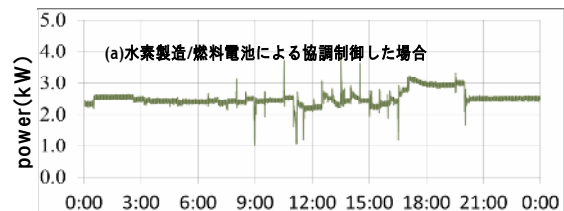


図 4 商用電力変動抑制効果の実証実験

(a)は(b)に比べ電力動揺少なく、ピークも小さい
(両図は図 3 のシミュレーション結果とほぼ一致している)

(2) 日射強度予測

太陽光発電(以下, PV)に起因する短周期変動を予測するために, 変動の主要因である移動平均雲量や高度などを精度良く予測するための手法を開発とその妥当性を検討した。具体的には, 日射強度及び雲量・雲底高度・気温や全天雲画像等の実測データを活用し, 季節及び時間帯別に様々な天候変化時の雲量・雲底高度と日射強度との相関関係を導出する。また, 衛星画像や複数台の全天雲画像装置等の実測データを活用し, 雲の変化(雲量・雲底高度)や移動方向を予測する手法を検討した。主な結果は以下の通りである。

①雲量や高度を把握する入力因子の検討

レーダ装置, 全天雲画像収集装置, スペクトル分光計等の実測データを収集し, 活用することにより, 短周期変動の要因となる雲量や高度を把握可能とする入力因子の相関について検討した。その結果, 日射強度は雲画像の彩度と明度に相関性が高いことが確認できた。

②雲量や高度と日射強度の相関性導出

気象レーダデータ, 全天雲画像と雲量・雲高との相関性を確認し, さらに平均雲の雲量ならびに雲高導出式を提案するとともに, 平均雲の雲高と日射強度の相関性を見だし, 日射強度を把握する上で重要な情報として利用可能性を確認した。

③雲の変化や移動方向の予測手法の検討

複数台の全天雲画像装置等の実測データを活用し, 雲の変化(雲量・雲底高度)や移動方向を予測する手法を提案した。

④日射強度予測の検証

a) 日射強度変動

キャンパス内 12 号館屋上における 2012 年 9 月~2013 年 8 月について, 日射強度変化の月別頻度を調べ, 8 月の例を図 5 に示す。同図によると, 太陽高度が高いほど, 日射変化の頻度が高くなる傾向が認められる。

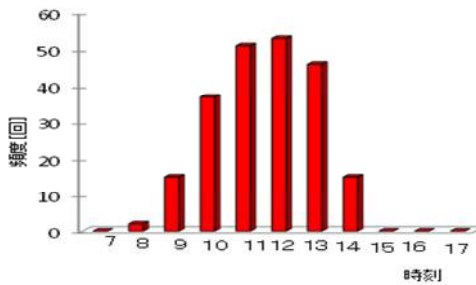


図 1 日射強度変化の時間帯別頻度(8 月)
(日射強度変化 0.7 kW/m^2 以上)

b) 雲量推定法の提案

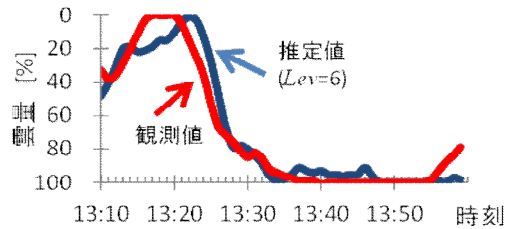
雲画像の一定の天頂角範囲内における彩度値 Lev より大きい値を示すメッシュ数 N をカウントする。解析対象域全体のメッシュ数 N_{max} とすると, 雲量の推定値 C_q は次式で表される。

$$C_q = \left(1 - \frac{N}{N_{max}}\right) \times 100 \quad [\%] \quad (4)$$

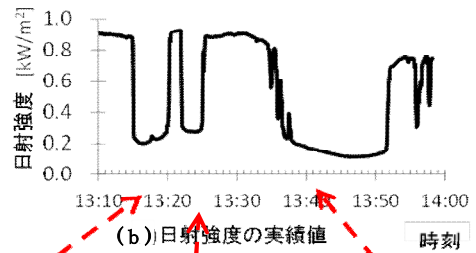
c) 雲量から日射強度推定法の提案

日射強度は次式により推定できる(図 6)。

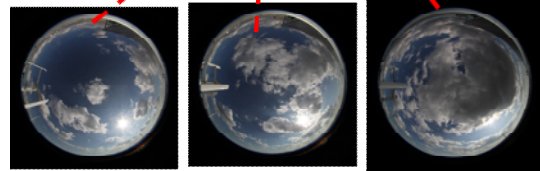
$$\text{日射強度} = \text{大気外日射強度} \times \left(1 - \frac{\text{雲量}[\%]}{100}\right) \quad (5)$$



(a) 雲量推定



(b) 日射強度の実績値



① 13:18 ② 13:26 ③ 13:42
(c) 全天雲画像写真

図 6 雲量推定と日射強度の相関性検証結果

d) 雲画像解析による地上影領域推定

画像上の雲形を N 角形で表し, N 角形の雲の重心点 (P) を雲形重心とする(図 7)。また, 頂点の座標を (x_i, y_i) とすると, 重心 (x_c, y_c) は以下の式により得られる。

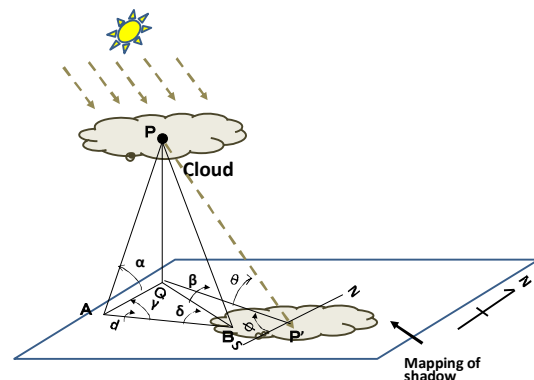


図 7 雲重心の直下点と影のマッピング

(A, B: 雲画像観測点, P: 雲の重心点
P': P の地上影位置, Q: P の地上の直下位置)

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (6)$$

$$x_c = \frac{1}{NA} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (7)$$

$$y_c = \frac{1}{NA} \sum_{i=0}^{N-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (8)$$

地上 A, B の 2 地点で撮影された雲形重心の高度, 直下座標など, 雲の位置情報が得られる。

$$PQ = AQtan\alpha \quad (9)$$

$$\frac{AQ}{\sin\delta} = \frac{AB}{\sin(180^\circ - (\gamma + \delta))} \quad (10)$$

したがって, 雲の高さ $PQ (=h)$ は次式により

$$\text{求まる。} \therefore PQ = AB \frac{\tan\alpha \sin\delta}{\sin(180^\circ - (\gamma + \delta))} \quad (11)$$

以上により, A 点を原点とし, 東西方向 X 軸, 南北方向 Y 軸, A 点と B 点を結ぶ直線と東西方向との角度 θ_{AB} を用いて, 点 P の直下点 Q の座標 (x_q, y_q) が求められる。

⑤地上影領域推定

地上で雲が投影される領域を地上影領域とする。雲の領域の直下点と影の対応地点までの距離 x は雲の高度 h , 太陽仰角 θ を用いて, 次式により推定できる。

$$x = h / \tan\theta \quad (12)$$

ここで, P 点直下 Q 点の座標 (x_q, y_q) と雲高 $h (=PQ)$, $PP' = h/\sin\theta$, $QP' = h/\cos\theta$, Q を中心とし, QP' と方位角 ϕ 直線と南北線との交点が地上影 P' 点となる。

地上影領域は原点を A 点とする距離座標で与えることができる。地上影領域の地図上へのマッピングは南北-東西による距離座標から緯度-経度座標への変換により実施される。

緯度 1 度の距離 : 111, 263, 283km

経度 1 度の距離 : 90. 582km

(ただし, 対象地点の緯度値, 経度値より算出)

⑥地上影推定例

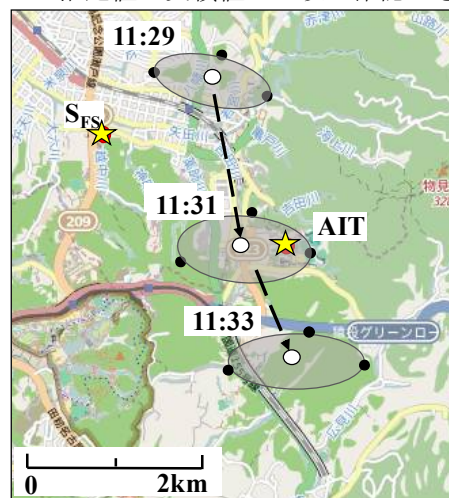
2 地点での時刻同期撮影された雲画像データを用いて, 地上影の推定を試みた。具体的には, 本学(AIT, 図 7 の A)と 2300m 離れている瀬戸消防署南分署 (S_{FS} , 図 7 の B)との全天雲画像を用いて, 晴天時における雲通過により一時的に曇(対象地点で影)となるケースについて地上影の推定を行う。推定結果の一例を図 8 に示す。同図では雲形重心が地上に投影される位置を地上影位置として図中の○で示した。雲画像のエッジ 3 点について地上影位置を通る近似楕円形を描き, 推定地上影領域とした。地上影推定結果の検証のために, 地上での日射強度観測値が $0.5\text{kW}/\text{m}^2$ 以上, 未満により判別する。すなわち,

日射強度 $0.5\text{kW}/\text{m}^2$ 以上 : 地上影なし(○印)

日射強度 $0.5\text{kW}/\text{m}^2$ 未満 : 地上影あり(●印)

として, 地上影推定結果を検証する。推定結果を表 2 にまとめた。同表上段に図 8 の結果を, 別日の例を下段に示した。なお, 地上日射強度は AIT で得られ, その観測値から地上影の有無を判別し, 同表の実績値欄に示した。地上影有無の推定値はその実績値に一致していることが分かる。

別の地上影領域の推定例として, 中部電力技術開発本部(中電技研)と 2180m 北西方向に位置する中部電力緑営業所との 2ヶ所の雲画像データを用いて同様の検討を行った。その結果を表 3 に示す。同表からも, 地上影有無について推定値と実績値の一致が確認できる。



<http://www.openstreetmap.org/>

図 8 地上影推定結果の時間推移
(2014 年 11 月 18 日)

○ : 雲形重心の地上影位置
 ○ : 雲形エッジ 3 点による近似楕円の地上影
 ☆ : 雲画像撮影装置設置点

表 2 地上影の推定結果(対象地点 : AIT)

年 /月 /日	時刻	雲重心			地上影推定結果	
		直下点		雲高 [m]	推定値	実績値 ()内日射強度
緯度	経度					
2014 /11 /18	11:29	35.201	137.1055	1993	○	○ (0.655kW/m ²)
	11:31	35.184	137.1104	1693	●	● (0.141kW/m ²)
	11:33	35.174	137.1159	1897	○	○ (0.628kW/m ²)
2014 /7 /25	13:35	35.198	137.1104	2255	○	○ (0.859kW/m ²)
	13:40	35.191	137.1111	1958	○	○ (0.833kW/m ²)
	13:45	35.183	137.1136	1468	●	● (0.157kW/m ²)

表 3 地上影の推定結果(対象地点: 中電技研)

年 /月 /日	時刻	雲重心			地上影推定結果	
		直下点		雲高 [m]	推定値	実績値 ()内日射強度
緯度	経度					
2014 /9 /16	13:41	35.0777	136.9450	1705	○	○ (0.787kW/m ²)
	13:44	35.0679	136.9427	1253	○	○ (0.680kW/m ²)
	13:47	35.0604	136.9510	1416	●	● (0.259kW/m ²)
2014 /11 /13	10:29	35.0698	136.9289	1582	●	● (0.156kW/m ²)
	10:31	35.0682	136.9416	1472	○	○ (0.625kW/m ²)
	10:33	35.0625	136.9503	1310	○	○ (0.645kW/m ²)

(3)まとめ

震災などの災害時などの孤立地域における電力の安定供給ならびに平常時におけるエコ電力供給と再生可能エネルギー普及による余剰電力対策を目的として、スマートグリッドを構築し、システムの運用や制御法を開発し、シミュレータによる模擬実験を実施した。主な成果は以下の通りである。

- ①太陽光発電、燃料電池、小容量蓄電池と負荷設備をDC連系することによりDCマイクログリッドを構築した。
- ②商用系統電力の変動を抑制するために、電源や負荷による電力動揺の長周期変動成分について運用計画を実施し、シミュレーションと実機による実証結果はほぼ一致した。
- ③短周期変動成分は比較的小容量の蓄電池(100kWh/day 需要設備に対して0.3kWh/day)により吸収できることを確認した。
- ④太陽光発電量予測に基づく運用計画を目的として雲画像を利用し、雲量推定による日射強度予測手法を提案できた。
- ⑤複数地点で得られる雲画像データにより雲の地上影推定法を提案し、手法の妥当性が確認できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ①雪田和人, 後藤泰之, 一柳勝宏, 「日射強度予測のための気象情報を用いた雲量観測」, スマートグリッド, 7月号, 2014年

[学会発表] (計35件)

- ①山本達也, 一柳勝宏, 水野勝教, 雪田和人, 後藤泰之, 山田富士宏, 山本信幸, 和澤良彦, 「PVに起因する短周期変動予測に関する基礎研究-雲量と日射強度との相関性の検討」, 電気設備学会全国大会講演論文集(CD-ROM) No. D-8 (2012.8) (名古屋大学)
- ②二宮貴之, 金納朋輝, 河合合成, 酒井智康, 雪田和人, 後藤泰之, 一柳勝宏, 廣瀬圭一, 後川知仁, 奥井芳明, 「太陽光発電量予測に基づいたマイクログリッドの運用」, 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集(CD-ROM), No. 136 (2012.9) (北海道大学)
- ③金納朋輝, 武田隆, 雪田和人, 後藤泰之, 一柳勝宏, 山田富士宏, 和澤良彦, 「気象データを用いた全天日射量予測」, 平成25年電気学会電力・エネルギー部門大会 Vol. 2013, 240 (2013.8) (新潟市朱鷺メッセ)
- ④梅本奨平, 一柳勝宏, 雪田和人, 後藤泰之, 「水素製造・燃料電池発電を含む連系システム運用の基礎的検討」, 平成25年度電気関係学会東海支部連合大会 Vol. 2013, E2-2 (2013.9) (静岡大学浜松キャンパス)
- ⑤河合竜児, 一柳勝宏, 水野勝教, 雪田和人, 後藤泰之, 山田富士宏, 和澤良彦, 「PVに起因する短周期変動予測に関する基礎研究-

大気外補正を用いた雲量から日射強度推定の精度向上」, 平成25年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同発表研究会 Vol. 2013, No137, Page. 497-500 (2013.11) (沖縄県市町村自治会館)

- ⑥梅本奨平, 一柳勝宏, 雪田和人, 後藤泰之, 「水素製造/燃料電池発電システムと蓄電池を含む連系システム運用の基礎的検討」, 平成26年電気学会全国大会 Vol. 2014, 7-025 (2014.3) (愛媛大学)
- ⑦梅本奨平, 一柳勝宏, 雪田和人, 後藤泰之, 「水素発生器/燃料電池発電を含むDCマイクログリッドの実験的検討」, 平成26年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会論文集 Vol. 2014, PE-14-069, PSE-14-069 (2014.9) (大阪府立大学))
- ⑧子安拓夫, 河合竜児, 一柳勝宏, 雪田和人, 後藤泰之, 小林和弘, 三輪靖, 「太陽光発電に起因する短周期変動予測-全天雲画像データによる地上影領域推定」, 電気学会全国大会論文集(CD-ROM) Vol. 2015, 6-086 (2015.3) (東京都市大学世田谷キャンパス)
- ⑨梅本奨平, 一柳勝宏, 雪田和人, 後藤泰之, 「水素製造/燃料電池を含む連系システムの週間運用の検討」, 電気学会全国大会論文集(CD-ROM) Vol. 2015, 6-164 (2014.3) (東京都市大学世田谷キャンパス)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

一柳 勝宏 (ICHIYANAGI KATSUHIRO)
愛知工業大学・工学部電気学科・教授
研究者番号：80064955

(2) 研究分担者

雪田 和人 (YUKITA KAZUTO)
愛知工業大学・工学部電気学科・教授
研究者番号：60298461
後藤 泰之 (GOTO YASUYUKI)
愛知工業大学・工学部電気学科・教授
研究者番号：70178458

(3) 連携研究者

なし