

太陽光発電装置と蓄電装置が導入された 小規模系統における次世代自動車の充電制御

Charge control of electric / plug-in hybrid automobile in power system with
PV and storage system

武田 隆^{*1}
Takashi TAKEDA

松尾 英徳^{*2}
Hidenori MATSUO

金納 朋輝^{*1}
Tomoki KINNO

雪田 和人^{*1}
Kazuto YUKITA

後藤 泰之^{*1}
Yasuyuki GOTO

一柳 勝宏^{*1}
Katsuhiko ICHIYANAGI

太田 拓弥^{*3}
Takuya OHTA

ABSTRACT

In future, the electric vehicle (EV) / the plug-in hybrid vehicle (PHV) will come into use with the arrival of Low-carbon society in the next twenty years. On the other hand, the power generation system using renewable energy installed in power system as one of the countermeasure for problems of the global warming. Then, the new problems in EV/PHV and energy will occur. This paper describes the examination is carried out on the charge control method of EV/ PHV in the small power system with photovoltaic and storage system for efficient use of the battery.

The effectiveness of the proposed method is verified using the small-scale micro grid and electric automobile.

キーワード：分散型電源，次世代自動車，充電制御，蓄電装置

Key words: Distributed generator, Next generation electric Vehicle, Charging control, Storage system

1. はじめに

地球温暖化防止，持続可能な社会の実現，エネルギー自給率の向上などが社会的な問題となっており，これら問題の一解決方法として，再生可能エネルギーを利用した分散型電源の導入が急速に進んでいる。特に分散型電源を用いた発電方式は，災害時においても自立して電力供給をできることから，各地域における避難所への導入がなされつつある¹⁾。また，このような社会的な問題に対しては，エネルギー供給分野だけでなく，運輸・輸送分野においても対策がなされつつある。このため，エンジン駆動と電動駆動を組み合わせたハイブリッド車（Hybrid vehicle: HV），さらに HV において商用系統からの充電を可能にしたプラグインハイブリッド車（Plug-in hybrid vehicle: PHV），電動駆動だけを用いた電気自動車（Electric vehicle: EV）など

が市場へ投入されつつある。また，EV の有効活用も期待されており，EV による家庭用給電装置の開発もなされている²⁾。このように，エネルギー分野や運輸・輸送分野において，前述した社会的な問題に対応するため，様々な取り組みがなされ期待がよせられている。

しかし，これらの対策のために，新しい問題も発生しつつある。例えば，再生可能エネルギーを利用した分散型電源は，出力が不安定なために，系統連系時における電圧変動問題³⁾，気象状況の変化による分散型電源のいっせいで起因した系統周波数低下問題などが表面化しつつある⁴⁾。また，EV/PHV においては，充電時において，充電電力が比較的大きいため，充電器が多数台ある地域では電圧変動問題⁵⁾，需要家においては充電時における契約電力の逸脱問題などが表面化しつつある。

このため，再生可能エネルギーを利用した分散型電源導入時の出力変動問題と EV/PHV の充電時における問題の両方を解決するために，EV/PHV を利活用した制御・運用手法が国内外で提案されている^{6)~14)}。

本論文では，太陽光発電装置と蓄電装置を導入した系統において，EV/PHV の蓄電装置としての利活用について検討を行った。（ここで，本論文では，系統容量が 50kVA 程度の電力系統を小規模系統とした。）具体的には，太陽光発電装置と蓄電装置を導入した系統における EV/PHV の

*1 愛知工業大学 工学部 電気学科
(〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247)

*2 NTT ファシリティーズ 研究開発本部
(〒170-0004 東京都豊島区北大塚 2-13-1 GH.Y ビル)

*3 山洋電気株式会社 テクノロジーセンター
(〒386-1211 長野県上田市下之郷 812-3)

(原稿受付:2013 年 8 月 23 日)

充電制御装置を開発し実験を行った。

その結果、本論文では、EV/PHV の充電制御により、車両としての利用ではなく蓄電装置としての利活用や可制御負荷としての効果について報告する。

2. EV/PHV の充電装置

現在、国内における EV/PHV における充電装置は、普通充電方式、倍速充電方式の交流給電方式と急速充電方式の直流給電方式^{15),16)}、非接触給電方式¹⁷⁾が提案されている。また、現在市販されている EV/PHV の蓄電池容量は、車種によって異なっており、約 5~24kWh、充電時間は单相 200V の普通充電器で約 7~8 時間である。このとき、使用されている交流充電器は、一般に電源線と通信線から構成されている¹⁸⁾。

この充電装置と車両を接続するコネクタ外形例を図 1 に示す。充電器は、信号線によって、車両との接続を検知するとともに、車両に充電装置の出力電流容量（利用可能電流）を通知する。車両は、この信号によって通知された利用可能電流範囲内の電流値にて、搭載している蓄電池の充電を実施する。

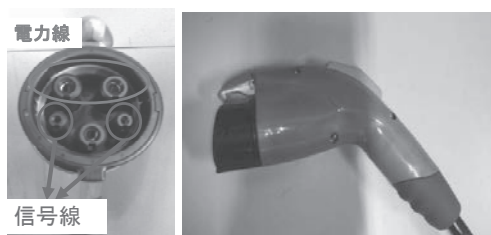


Fig.1 Charge connector outside.

図 1 充電コネクタ外形例

3. 交流充電制御方法

EV/PHV の交流充電に関して、制御方法と開発した制御手法を以下に示す。

3.1 交流充電制御方法

EV/PHV の交流充電時における制御手順を、以下に示す¹⁹⁾。

(1) 車両接続検出 充電コネクタは、Control Pilot 信号（CPLT）電圧の変動をモニタし、コネクタが車に接続されたことを認識する。

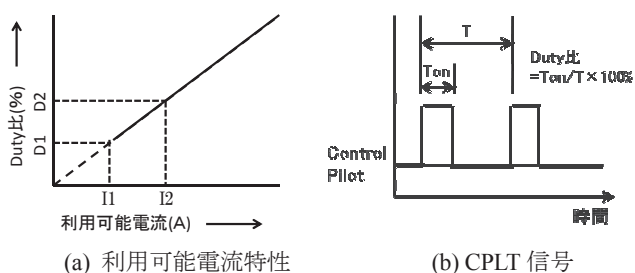


Fig.2 Pattern of control pilot signal.

図 2 Control Pilot 信号の波形

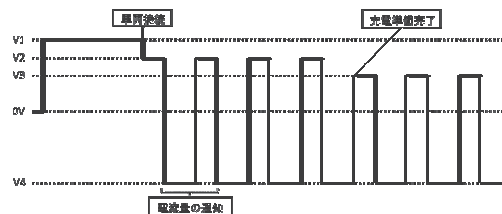


Fig.3 Control pilot signal monitored from vehicle.

図 3 車両側からみた Control Pilot 信号

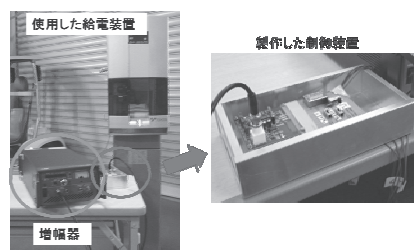
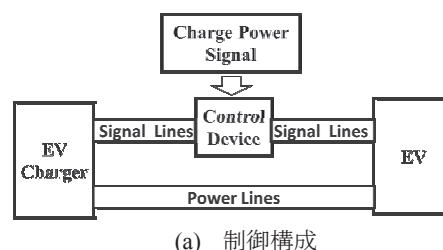


Fig.4 Concept of charge control system.

図 4 開発した充電制御装置の概念

(2) 電流定格値の通知 充電コネクタは充電設備の定格電流を CPLT のデューティ比で通知する。

(3) 車両充電準備の完了通知 充電コネクタは、CPLT の電圧（V2→V3）を変化させることにより充電準備完了を通知する。

(4) 内部接点接続 充電準備完了を検出した後、充電を開始するために内部接続スイッチを接続する。

ここで、CPLT の波形を図 2 に示す。同図(a)は利用可能電流とデューティ比の関係であり、同図(b)は CPLT の一例である。また、手順(1)から手順(4)までの CPLT の変化を図 3 に示す。同図に示すように、車両接続、電流量通知、充電準備完了までを双方向通信で実施している。

3.2 開発した充電制御装置

本論文では、EV/PHV を移動するものとしての利用だけでなく、蓄電装置としての利活用を目指すため充電制御装置を開発した。この充電制御を実施することにより、太陽光発電装置と蓄電装置が導入された系統において、EV/PHV の利用により、利用した容量の蓄電容量が増加することが期待できる。

ここで、電力系統の系統制御に関して考えてみると、EV/PHV の充電制御が利用できれば、可制御性が高い負荷として期待でき、大量導入された場合、系統制御にも貢献できる可能性がある。

本論文で開発した EV/PHV の充電制御装置の概念を図 4 に示す。同図(a)に示すように、EV/PHV と充電器との制

御信号線間に、開発した装置を導入し、制御信号を変化させることで、EV/PHV への充電制御を実施する。また、同図(b)に製作した制御装置と使用した充電装置を示す。そして、この充電制御の制御則を図 5 に示す。同図に示すように、充電開始に制御信号を読み込み、充電可能電流の制御を実施するものとしている。充電可能電流値 I_A の設定は、0A, 6A, 9A, 12A, 15A, 18A までの 6 段階に変更するも

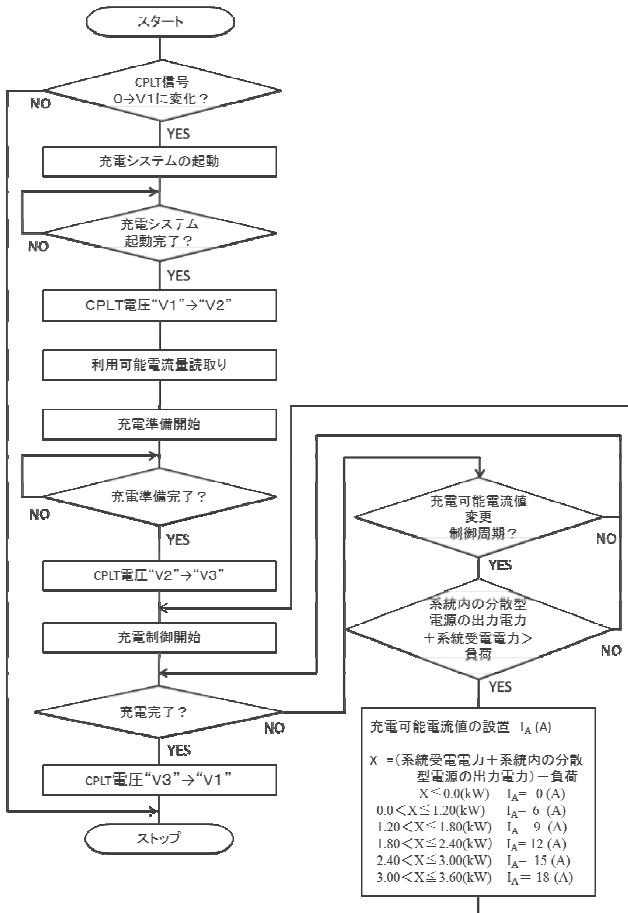


Fig.5 Flow chart of charge control.

図 5 充電制御の流れ図

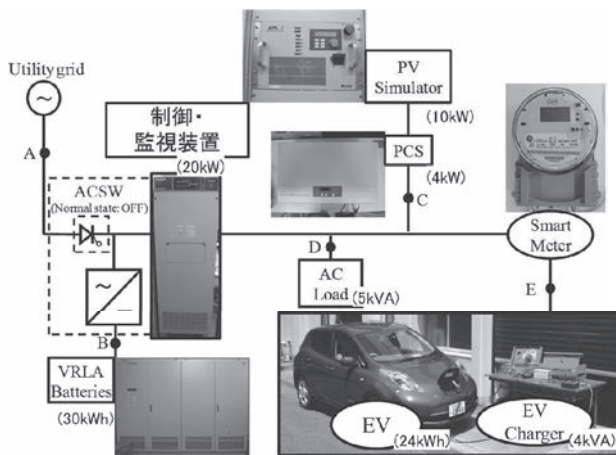


Fig.6 Block diagram of an experiment system.

図 6 実験システムの構成図

のとした。この 6 段階への変更は、太陽光発電装置、蓄電装置が導入された小規模システムにおける発電電力および受電電力の総和と負荷との差分 X を算出し、以下に示す制御則に従って充電可能電流値を決定している。

$$\begin{aligned} X &\leq 0.0(\text{kW}), I_A=0.0 \text{ (A)} \cdots(1) \\ 0.0(\text{kW}) &< X \leq 1.2(\text{kW}), I_A=6.0 \text{ (A)} \cdots(2) \\ 1.2(\text{kW}) &< X \leq 1.8(\text{kW}), I_A=9.0 \text{ (A)} \cdots(3) \\ 1.8(\text{kW}) &< X \leq 2.4(\text{kW}), I_A=12.0 \text{ (A)} \cdots(4) \\ 2.4(\text{kW}) &< X \leq 3.0(\text{kW}), I_A=15.0 \text{ (A)} \cdots(5) \\ 3.0(\text{kW}) &< X \leq 3.6(\text{kW}), I_A=18.0 \text{ (A)} \cdots(6) \end{aligned}$$

ここで、 $X = (\text{系統内における分散型電源の出力}) + (\text{系統受電電力}) - \text{負荷}$ である。

この充電可能電流値は、制御周期ごとに変更するものとしている。この装置の応答速度は、車両との通信があるため充電電流の変更に約 10 秒間必要とする。このため、最低でも電流値の変更は、10 秒間以上必要になる。

本論文では、上述したように充電電力の制御量を 1.2kW から 3.6kW までとし、階段状に制御を実施するため、制御周期を 5 分間と設定している。これにより、電力系統の負荷周波数制御の制御対象域の比較的周期の長い負荷変動を対象とすることになる。ここで充電装置の定格値は、電圧 200V で電流 20A である。

4. EV/PHV の充電制御実験

EV/PHV の充電を考えた場合、通常は車両として使用した後に充電することが想定される。しかし、近年の社会的な状況を考慮するとエネルギー蓄積要素として、電力需給への加担も検討され EV/PHV などの使用環境は、多様化しているものと思われる²⁰⁾。

そこで、本論文においては EV/PHV が駐車中での価値向上(蓄電装置としての利用)も考慮に入れた検討を実施するため、搭載している蓄電池を満充電ではなく、一定容量の余裕を持たせるものとした。ここで、この一定容量の余裕は、本論文では約 20 から 30%と想定する。これは、現在の急速充電器を考えた場合、急速充電では車両蓄電装置の 80%充電とも一致するので、車両としての使用には、影響を与えないものと思われる。さらに、自家用車の年間実働率は登録車の約 65%であり、1 日の平均走行距離は、約 40km であるとの報告がある²¹⁾。従って、EV/PHV を考えた場合、走行距離と搭載蓄電容量からみても、蓄電装置として活用することができるものと思われる。

本論文で用いた実験の系統構成を図 6 に示す。同図に示す装置の仕様を表 1 に示す。図中に示すように、太陽光発電装置、蓄電装置、EV/PHV の充電装置、制御・監視装置で構成している。これらの実験装置を用いて太陽光発電装置と蓄電装置導入システムにおける実験で、EV/PHV の充電制御効果について検討を行った。実験内容は、次に示す代表的な 2 つの場合である。

- 1) EV/PHV の充電制御を実施した場合
- 2) EV/PHV が導入されていない場合

表 1 実験装置の仕様

Table 1 Specification of the equipment.

装置	定格
制御監視装置	20kVA
PV シミュレータ	10kVA
系統連系装置	4kVA
蓄電装置	30kWh (容量 10 時間率 100Ah) (容量 5 時間率 65Ah)
電気自動車 の蓄電容量	24kWh (カタログ値) *実験での容量は 7.2kWh とした。

ここで、太陽光発電装置と蓄電装置が導入された小規模系統において、太陽光発電装置、負荷との調整は、主に蓄電装置（鉛電池）にて実施するものとしている。また、この小規模系統においては、常に系統からある一定電力量（ここでは 2kW を一定受電）を受電するものとした。ここで、用いた鉛蓄電池の時間率を表 1 に示す。

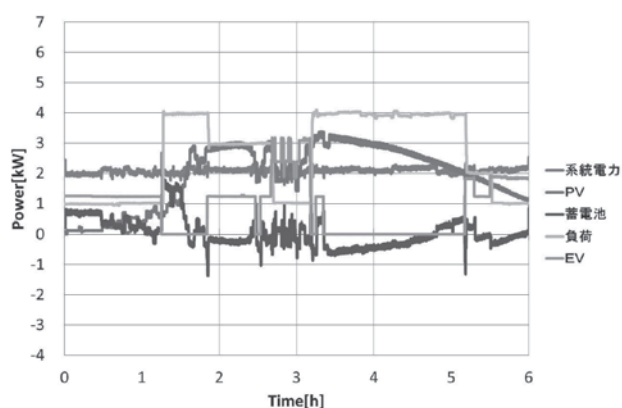


Fig.7 Characteristics of electric power (introducing EV).

図 7 EV を導入した場合の電力特性

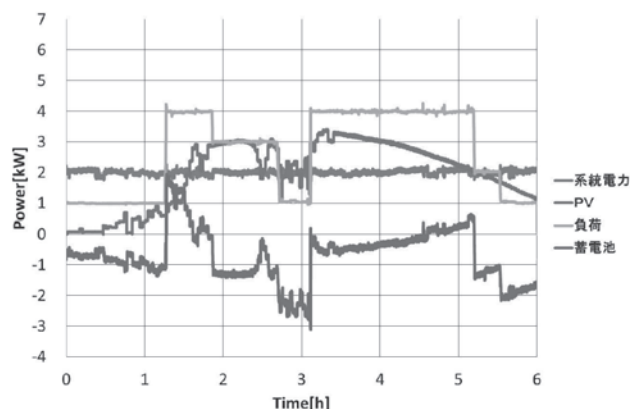


Fig.9 Characteristics of electric power (without EV).

図 9 EV を導入していない場合の電力特性

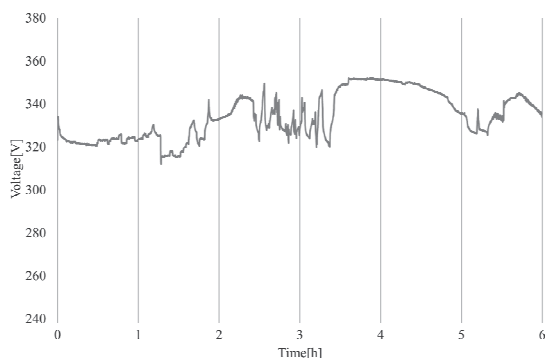


Fig.8 Characteristics of voltage of a storage battery (introducing EV).

図 8 EV を導入した場合の蓄電池の電圧特性

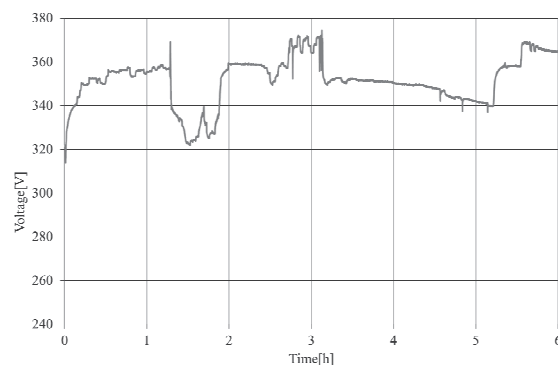


Fig.10 Characteristics of voltage of a storage battery (without EV).

図 10 EV を導入していない場合の蓄電池の電圧特性

具体的に実施する制御は、充電制御であるから、小規模系統に導入されている分散型電源と太陽光発電装置の出力との総和から消費電力である負荷との差をとり、余剰電力を算出する。この余剰電力値を、上述した(1)式から(6)式の条件により、EV の充電可能電流値を設定している。実験は 6 時間での実施とし、太陽光発電装置の出力は PV シミュレータを用いて、上記 2 つの比較を、同一条件で実施できるようにした。このときの太陽光発電の出力特性は、雨から曇りそして晴天になった実測日の日射量を模擬している。また、この日の太陽光発電装置の最大出力は約 3kW とした。EV は日産リーフを用いた。系統の蓄電装置は、MSE 型の鉛蓄電池約 30kWh を用いている。負荷は、最大で約 4kW の変動があるものとした。ここで、3.2 で述べたように EV/PHV の充電装置における充電可能電流値の制御周期は、5 分間とした。このため瞬時の調整は、系統に導入された蓄電装置が担っている。電力系統の周波数制御に対応させて、この制御分担を考えると、調速機制御域と負荷周波数制御域の比較的早い変動成分（負荷変動のサイクリック分とフリンジ分の一部）を鉛蓄電池にて分担させ、比較的のゆっくりした数分程度の負荷変動（上記で対応できなかったフリンジ分とサステンド分の一部）を EV の充電

表 2 蓄電池の電力特性比較

Table 2 Comparison of the electric power of storage battery.

	EV あり		EV なし	
	蓄電電力 (W)	蓄電電力変化 (W/s)	蓄電電力 (W)	蓄電電力 変化(W/s)
標準 偏差	471.0	164.4	845.1	204.8
平均	51.1	-0.91	-711.9	-2.96

表 3 蓄電池の電圧比較

Table 3 Comparison of the voltage of storage battery.

	EV あり	EV なし
	電圧値(V)	電圧値(V)
最大値	352.4	374.4
最小値	312.0	314.0
平均	334.5	351.6

制御にて分担するものとしている。

図 7 は EV が導入され制御を実施した場合の電力特性、図 8 は、このときの蓄電池電圧特性である。また、図 9 は EV が導入されていない場合の電力特性であり、図 10 は、このときの蓄電池電圧特性である。図 7 には、系統の受電電力、太陽光発電装置の出力 (PV)、負荷、蓄電装置からの出力、EV の充電特性を示している。図 9 には系統の受電電力、太陽光発電装置の出力 (PV)、負荷、蓄電装置からの出力を示している。この各特性では太陽光発電の発電量は正方向、負荷の消費量も正方向であり、蓄電装置の出力が正方向の場合は放電を示し、負方向の場合は充電を示している。EV の充電特性は正方向を充電としている。

ここでこの実験では、EV は約 70% を充電の初期状態とし、約 7.2kWh の充電容量があるものとしている。

図 7 と図 9 を比較すると、太陽光発電装置の発電量と消費している負荷変動が同一としたため、蓄電装置の変動量の比較検討ができることになる。そこで、蓄電装置の充放電に関して比較すると、図 7 では最大ピーク幅約 3kW の変動であるのに対して、図 9 では、約 4.5kW の変動である。この図 7 と図 9 の蓄電装置の電力特性の比較を、表 2 に示す。同表には、蓄電電力の標準偏差値と平均値を各々示している。ここで、本論文では、変動のフリンジ分を分担させる目的から、表 2 の各値は 1 分間の平均値から算出している。そこで EV ありの場合と EV なしの場合を、EV なしを基準として比較すると、蓄電電力の標準偏差が EV を導入することにより、55.7% (471.0/845.1) に改善されていることがわかる。また、蓄電電力の変化に関して dP/dt (W/s) を比較すると、約 2.0W の差があることがわかる。そこで、充電量の比較をするため、 $dP/dt < 0$ の場合のみについて注目すると、最大値で EV ありの場合 728.5W/s となり EV なしの場合は 2681.1W/s となっており、EV ありの場合は約 27.2% 程度に、充電電力の最大変化を抑えていることがわかる。平均値でみると、EV ありの場合 155.8W/s であり、EV なしの場合 804.8W/s となっており、約 20% 改善している。さらに図 8 と図 10 の電圧特性について注目する。この

ときの特性比較を表 3 に示す。電圧変動幅について比較すると、EV なしの場合は 60.4V の変化であるのに対して、EV ありの場合は 40.4V である。ここで、EV ありの場合と EV なしの場合とを比較すると、約 6.7 割になっていることがわかる。ここで電圧特性の平均値を比較すると、EV ありの場合は 334.5V となり、充電容量に余裕があることがわかる。また、EV への充電量は、約 5.6kWh であった。

ここで、仮に EV の充電装置が導入された系統にて EV の充電制御を実施しない場合を考えてみる。このとき、EV の充電量が 70% とすると、系統からの普通充電方式を実施すると約 3kW 一定で車両に充電される。(この 3kW の一定受電方式は、製品カタログ値を参照。) 従って、実験で使用した負荷特性を考慮すると、負荷需要に車両の充電量である 3kW が加算されることになる。この場合、ある時間帯においては受電電力が大きくなり、契約電力以上の電力消費が懸念される。

このような観点からも、充電制御は有効であると言える。

5. まとめ

本論文では、太陽光発電装置と蓄電装置が導入された小規模システムにおいて、今後普及してくると期待されている EV/PHV の充電制御を実施し、蓄電装置としての可能性について検討を実施した。このとき、充電制御を実施するため、本論文では EV/PHV への充電制御方法を開発し、その制御装置を製作した。そして開発した制御手法・製作した装置の有効性を確認するため、太陽光発電シミュレータ、系統連系装置、制御・管理装置、蓄電装置、負荷装置からなる系統において、EV の充電制御実施時と EV が導入されていない場合について、実験による比較検討を実施した。

その結果、本論文での主な実験成果を以下に示す。

- (1) 充電制御を実施することにより、系統に導入されている蓄電装置の充電電力の変化を約 50% に抑制できた。
- (2) EV の充電制御をすることにより、可制御負荷であることを示した。このため充電制御を大量導入された電力系統において、実施すると系統制御に貢献できる可能性を示した。
- (3) EV の充電を 70% 程度にすることにより、残り 30% を蓄電装置として活用する可能性を示した。
- (4) 太陽電池発電装置と蓄電装置で構成されたグリッドでの自立運転実施時に蓄電池の充電容量が満充電に近い状況において、EV を用いることにより、太陽光発電の出力抑制に貢献できる。

さらに、EV の給電装置が導入された系統で、充電制御を実施すると契約電力量の逸脱問題の解決ができる可能性を示した。

今回、本論文における充電可能電流値の決定に関して、制御目標 (例えば分散型電源の出力変動抑制、実験系統の受電電力量制御など) に応じて変更できれば、充電制御のみで系統制御に貢献できる可能性があることを示した。

今後は、EV/PHV の実運用に基づいた残電力量を考慮

した検討を実施するとともに、EV からの放電制御も取り入れて検討をしていきたい。

参考文献

- 1) 例えば、仙台市役所：防災対応型太陽光発電システム導入事業 http://www.city.sendai.jp/business/d/1204672_1434.html
- 2) 例えば、日産自動車：リーフホームページ <http://ev.nissan.co.jp/LEAFTOHOME/>
- 3) 例えば、経済産業省エネルギー・新エネルギー部：再生可能エネルギー導入拡大に向けた電力システムにおける課題、(2012),http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/sougou/denryoku_system_kaikaku/pdf/003_s01_05.pdf (2012)
- 4) VDE: Conclusion of the study on the "50.2 Hz shutdown of PV systems in the low voltage distribution network" <http://www.vde.com/en/fnn/pages/50-2-hz.aspx>
- 5) 野田琢, 樺澤祐一郎, 福島健太, 根本孝七, 上村敏：電気自動車普通充電器からの無効電力注入による夜間一斉充電時の需要家電圧低下補償手法：電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), Vol.132.No.2, pp.163-170 (2012.02.01)
- 6) 石橋和樹, 三谷康範, 渡邊政幸, 舟橋俊久：「太陽光発電大量導入時の電力品質向上のための電気自動車充電制御管理表示システムの構築」, 平 24 年 電気設備学会全国大会, No.D-23, pp.219-220, (2012).
- 7) 野田, 三谷, 渡邊, 原田, 山田, 藤：「太陽光発電と電気自動車による機能的自立電力供給システム」, 平 24 年電気学会全国大会, No.6-188 (2012).
- 8) 太田豊, 谷口治人, 鈴木宏和, 中島達人, 馬場旬平, 横山昭彦：「電気自動車／充電インフラの V2G (Vehicle-to-Grid) テストシステムの構築」, 平 24 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No. 149 (2012).
- 9) 石田隆張：「EV 充電方式の配電線ロス低減の効果」, 電気学会, 電力技術, 電力系統技術合同研究会, PE-11-108, PSE-11-125, pp.119-124, (2011)
- 10) 高木雅昭, 山本博巳, 山地憲治, 岡野邦彦, 日渡良爾, 池谷知彦: LFC 信号を用いたプラグインハイブリッド車の充電制御による負荷周波数制御手法, 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌) Vol. 129-B No. 11, pp.1333-1241, (2009)
- 11) 高木雅昭, 岩船由美子, 山本博巳, 山地憲治, 岡野邦彦, 日渡良爾, 池谷知彦: プラグインハイブリッド車の負荷持続曲線に基づいたボトム充電アルゴリズム, 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌) Vol. 130-B No. 8, pp.727-736, (2010)
- 12) 二宮貴之, 小澄直也, 金納朋輝, 河合智成, 酒井浩太, 酒井智康, 雪田和人, 後藤泰之, 一柳勝宏, 後川知仁, 他: マイクログリッドにおける次世代自動車の充電制御: 電気学会, 電力技術, 電力系統技術合同研究会, PE-12-105, PSE-12-125, pp.79-84, (2012)
- 13) 北條昌秀, 三谷康範, 樋口登, 山口浩, 西村和則, 雪田 和人: エネルギーバッファとしての車載及び定置型蓄電池の応用, 平成 25 年電気学会全国大会
- 14) 例えば, EV・PHV 普通充電設備の設置に関する検討, 電力中央研究所 研究報告書(電力中央研究所報告)2010-3
- 15) 電気自動車用急速充電器の設置・運用に関する手引書, CHAdeMO 協議会
- 16) 電動車両用電力供給システム協議会 <http://evpossa.or.jp/>
- 17) 例えば, 非接触給電システム, 昭和飛行機工業 www.showa-aircraft.co.jp/products/EV/catalog_kyuuden.pdf
- 18) SAE 規格 “SAE J1772 : SAE Electric Vehicle Conductive Charge Coupler”
- 19) 釜賀隆市, 森口広, 福嶋孝章, 福井誠志, 日比野卓也, 鷹取剛: 「プラグインハイブリッド制御 EUC の開発」, 富士通テクノ技報, Vol.28, No.1, (2010 年 6 月)
- 20) 日産自動車: リーフを使って電気代を節約 <http://ev.nissan.co.jp/LEAFTOHOME/>
- 21) ガベージニュース: 自家用車の年間平均走行距離をグラフ化してみる, <http://www.garbagegenews.net/archives/1678484.html>