

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420922

研究課題名(和文) 太陽光発電の大量連系された高低圧配電系統における電気自動車の充電マネジメント手法

研究課題名(英文) A Methodology for Charging Electric Vehicles under Medium-Voltage and Low-Voltage Distribution Networks with High Penetration of Photovoltaics

研究代表者

杉原 英治 (Hideharu, Sugihara)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10359854

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：将来の配電系統においては、太陽光発電(PV)の大量連系が必須になるため、間欠的なPV発電電力を積極的に活用した電気自動車(EV)の充電マネジメント手法が求められる。本研究では、PVによる配電電圧上昇問題とEV急速充電による電圧降下・電流容量制約の問題を同時に解決するような新しいEV充電マネジメント手法を開発することを目的とし、配電系統の運用制約下においてPV出力予測に基づくEV急速充電の最大可能台数を評価する手法を開発した。さらに、実際のPV出力が予測値より低下した場合には、低圧連系された家庭用PVインバータの力率制御により、EV充電可能台数を維持できる可能性があることを定量的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In future distribution networks with high penetrated photovoltaic (PV) generations, intermittent PV generations must be effectively utilized for charging electric vehicles (EVs) with batteries. The purpose of this research project is to resolve both the voltage-rise problems by PV integration and the voltage-drop and the distribution line capacity problems by fast EV charging simultaneously. Therefore, a new methodology for evaluating the fast EV chargeable capacity under the voltage constraints in medium-voltage and low-voltage distribution networks was developed based on the short-term prediction values of the PV output. Furthermore, assuming a case that the PV output is suddenly reduced by cloud passing, the fast EV chargeable capacity was evaluated considering the reactive power support from roof-top PV inverters.

研究分野：エネルギーシステム

キーワード：配電系統 太陽光発電 電気自動車 電圧制約

### 1. 研究開始当初の背景

環境負荷削減やエネルギー利用効率の向上の観点から輸送部門の電化が進んでおり、特にプラグインハイブリッド自動車や電気自動車(以下、EV)の普及が期待されている。ただし、その導入台数が増えてくると充電時の電力需要が大きくなり、配電系統内における電圧下限制約・電流上限制約といった技術的な運用制約を逸脱する可能性がある。

一方、今後の配電系統(特に住宅地域における配電系統)においては、太陽光発電(以下、PV)の大量連系が必須になるため、間欠的なPV発電電力を積極的に活用したEVの充電マネジメント手法が求められる。ただし、その際に留意すべき点として、家庭用のPVやEV普通充電は低圧受電であるのに対して、急速充電は主に高圧受電となるため、それら両充電形態の相互影響を適切に扱うためには高圧系統と低圧系統を同時に考慮した高低圧配電系統を用いて様々な分析を行う必要がある。特に、PVによる配電線電圧上昇問題と、EVの急速充電による電圧降下問題は、配電系統に与えるインパクトとしては逆向きとなるため、適切にマネジメントすることが重要である。

### 2. 研究の目的

本課題では、配電系統における最適潮流計算手法をベースとして、PVによる配電線電圧上昇問題と、EVの急速充電による電圧降下・電流容量制約の問題を同時に解決するようなEV充電マネジメント手法を開発することを目的とした。具体的には、短時間先のPV出力予測値に基づき配電系統の運用制約下におけるEV急速充電最大可能台数(容量)を評価する手法を開発する。さらに、PV出力が予測値より小さい場合、通常はEVの充電可能台数も減少することになるが、PVインバータの空き容量を活用し進相無効電力を供給することにより、EV充電可能台数を拡大する可能性について検討する。

### 3. 研究の方法

研究方法としては、大きく分けて(1)モデル配電系統の構築、(2)配電系統制約下におけるEV充電可能容量評価手法の開発、(3)PV出力を考慮したEV充電可能容量に関する分析、について実施した。それぞれの概要は、以下の通りである。

#### (1) モデル配電系統の構築

対象系統としてEV急速充電や普通充電、住宅用PVを考慮するため、高圧系統と低圧系統を同時に考慮した高低圧配電系統モデルを構築する。各配電線や柱上変圧器等のインピーダンスについては、実際の配電線等を想定した値を用いた。

#### (2) EV充電可能容量評価手法の開発

放射状配電系統における潮流計算法としてDistFlow法を用いて、高低圧配電系統の運用制約下におけるEV急速充電最大可能台数(容量)を評価する手法を開発した。シミュレーション評価においては、定式化された非線形計画問題を求解するため、汎用数理計画ソルバー(GAMS/CONOPT)を使用した。

#### (3) EV充電可能容量に関する分析

配電系統の電圧制約下におけるEV最大充電可能容量を評価するとともに、空間的に充電機会を均等化することを目的とした均等充電可能容量も評価した。次に、PV出力予測を想定し、家庭用PV発電電力による電圧上昇を考慮したEV充電可能容量を評価した。ここでPV発電電力が予測値より低下した場合には、PVインバータの空き容量を活用してEV充電可能容量の拡大効果を評価した。さらに、低圧系統内に連系するEV普通充電を対象として、EV充電負荷の接続位置がPV最大出力に与える影響を評価することにより、PV発電可能量に与える影響を評価した。

### 4. 研究成果

#### (1) EV充電可能容量の評価手法

本研究課題において基本となる問題設定(定式化)として、配電系統の電圧制約下におけるEV最大充電可能容量の評価手法を開発した。詳細を(1)~(6)式に示す。なお、EV急速充電ステーション各地点におけるEV充電可能量を等しくする制約条件を追加すると、EV均等充電可能量を評価することができる。

##### 【目的関数】

$$\text{Max} \sum_{i=1}^I PG_i^{EV} \quad (1)$$

##### 【制約条件】

$$P_{i+1} = P_i - \frac{r_i(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} - PL_{i+1} + PG_{i+1}^{EV} \quad (2)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - \frac{x_i(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} - QL_{i+1} \quad (3)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 + \frac{(r_i^2 + x_i^2)(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} - 2(r_i P_i + x_i Q_i) \quad (4)$$

$$0 \leq PG_i^{EV} \leq EV_i^{max} \quad (5)$$

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (6)$$

ただし、 $P_i, Q_i$ :母線*i*から母線*i+1*へ向けて流れる有効電力潮流及び無効電力潮流、 $V_i$ :母線*i*の電圧、 $r_i, x_i$ :母線*i*から母線*i+1*の線路抵抗及び線路リアクタンス、 $PL_i, QL_i$ :母線*i*の有効電力負荷及び無効電力負荷、 $PG_i^{EV}$ :母線*i*のEV充電負荷(但し肩字の $max, min$ は上限値、

下限値を示す)

また、上述の定式化では理想的な観点から分析するため、EV 充電負荷を連続変数として最適化問題を定式化している。EV 急速充電負荷(例えば 50kW 単位)で離散化するため、図 1 に示すフローチャートに基づき充電可能台数を評価する方法を開発した。

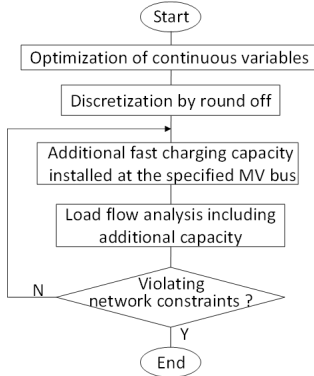
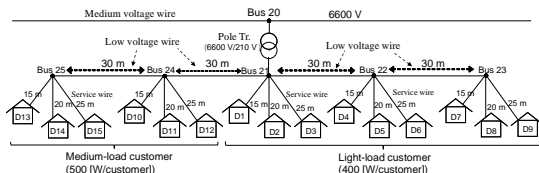


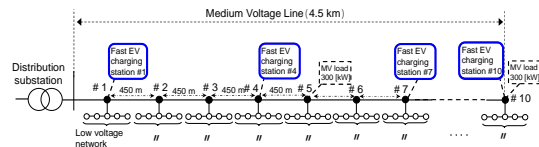
図 1 フローチャート

(2) 高低圧配電システムモデルの構築と EV 充電可能容量の評価

EV 急速充電による配電システムへの影響評価と、住宅用 PV の大量連系による影響を同時に評価するため、図 2 に示す高低圧配電システムモデルを構築した。低圧システム内には 15 軒の住宅需要家が存在するものとする。高圧配電線フィードには、4 か所の EV 急速充電ステーションが存在し、各ステーションにおいて最大 10 台の EV が急速充電可能であるものとする。



(a) 低圧システムモデル



(b) 高圧システムモデル

図 2 構築した高低圧配電システムモデル

表 1 EV 充電可能台数(容量)の評価結果

Objective function	EV capacity model	Station #1	Station #4	Station #7	Station #10	Total
Maximizing EV capacity	Continuous variable [kW]	500.0	272.0	0.0	0.0	772.0
	Discrete variable	10	5	0	0	15
Equally Maximizing EV capacity	Continuous variable [kW]	69.1	69.1	69.1	69.1	276.2
	Discrete variable	2	2	1	1	6

EV 充電可能容量の評価結果を表 1 に示す。まず、理想的な観点から EV 連系可能な場合を想定し、配電システム全体における EV 充電可能容量を最大化した結果、配電用変電所に近い充電ステーションに集中的に配分され、15 台の EV が同時に充電可能な結果となった。ただし、現実的には EV 充電位置は指定できないため、空間的に出来る限り均等に EV 充電するものとする、EV 充電可能台数は 6 台となり大きく減少した。ここで、最大充電可能容量に対する均等充電可能容量の割合を空間的な均等化率として定義すると、40%以下となり地域的な不公平性が高くなる結果となった。

(3) 住宅用 PV による EV 急速充電可能容量の改善効果

低圧配電システム内において、住宅用 PV が大量連系している状況を想定し、快晴時には高圧配電線フィードの潮流が軽くなることにより、EV 最大充電可能容量および均等充電可能容量の両方が、ベースケースに比べて大きく増加できることを示した(図 3 の P100 ケース)。ただし、この場合、日射量が低下し PV 発電量が予測値に対して 90%、80%、70%、60%へ低下すると、EV 充電可能容量も減少する(図 3 の P90~P60 ケース)。そこで、発電量の低下した PV インバータには空き容量があることに着目し、図 4 に示すようにインバータ容量範囲内で無効電力も出力することにより、EV 充電可能容量を PV 快晴時と同等以上に維持できることを示した(図 3 の PQ90~PQ60 ケース)。

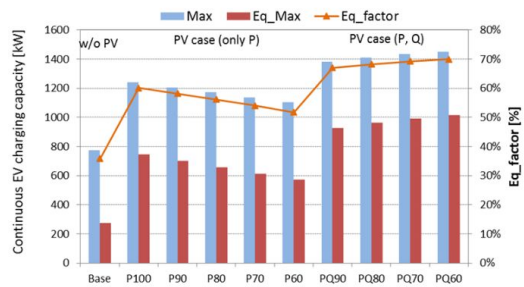


図 3 EV 充電可能容量の評価結果

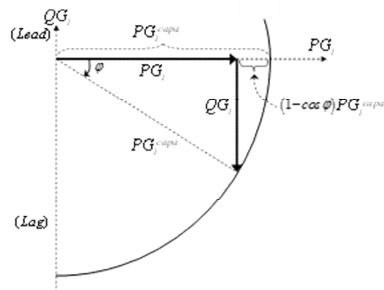


図 4 PV インバータの力率調整の概念図

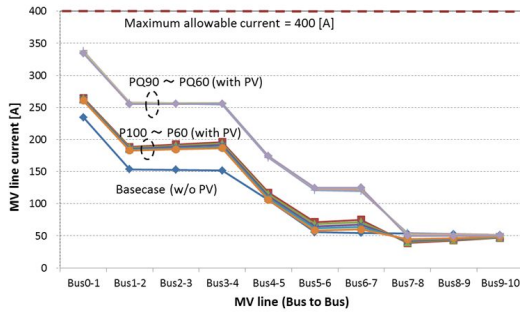


図5 高圧線フィーダ電流への影響評価

さらに、通常の配電系統においては大量導入された PV インバータから無効電力を出力すると、高圧配電線フィーダの線路容量制約を超過することが懸念される。そこで、配電線電流制約の観点から評価を行った結果、図5に示す通り今回用いたモデル系統では物理的な定格電流値(400A)よりも十分に小さく、系統運用上の上限値とほぼ同等程度になることを確認した。

#### (4) EV 充電による PV 発電可能量の改善効果

ここでは逆に EV 充電に伴う PV 発電可能量の改善効果の評価するため、低圧配電系統における EV 普通充電(3kW)を想定し、充電地点(充電需要家)が異なることによる PV 発電可能量の改善効果の評価した結果を図6に示す。低圧系統内において充電需要家の位置が柱上変圧器の直下の場合に比べ、低圧配電線フィーダの末端に位置する場合には PV 発電可能量は2倍以上大きくなることを示した。特に、今回のモデル系統においては充電負荷(3kW)よりも大きな改善効果が得られており、同じ低圧配電系統内であっても EV 充電位置が極めて重要であることを定量的に明らかにした。

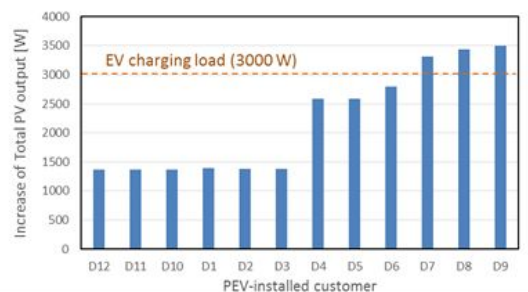


図6 低圧系統内における EV 充電による PV 発電可能量の改善効果

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

H. Sugihara, T. Funaki, Y. Matsuura, K. Abe, M. Minami: "PV-installable capacity in

medium- and low-voltage distribution networks with optimal LDC parameters", ASCE Journal of Energy Engineering, Vol. 143, Issue 3, (2017), 査読有, DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000358

H. Sugihara, T. Funaki: "An Analysis on Photovoltaic Output Restrictions and Load Management under Voltage Constraints in a Residential Low-Voltage Distribution Network", Proceedings of IEEE Innovative Smart Grid Technology - Asia conference 2016, Paper ThAM2T3.4 (2016), 査読有, DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2016.7796482

H. Sugihara, T. Funaki: "Evaluation of Electric Vehicle with Fast Charging Capacity in Medium-Voltage and Low-Voltage Distribution Networks Using Rooftop PV", Proceedings of 10th International Renewable Energy Storage Conference 2016 (IRES2016), No.B3-4(4), (2016), 査読有

H. Sugihara, T. Funaki: "A method for evaluating installable capacity of distributed generators with power factor control in MV and LV distribution networks", Proceedings of IEEE Innovative Smart Grid Conference Europe 2013, pp.1-5, (2013), 査読有, DOI: 10.1109/ISGTEurope.2013.6695304

〔学会発表〕(計3件)

杉原英治:「配電ネットワークの電圧制約下における分散型電源の連系可能容量に関する分析 - インバータの力率調整による影響評価 -」, 電気学会 C 部門大会講演論文集 No.OS4-4, 2014年9月3-6日, 島根大学, 松江市

杉原英治, 舟木剛, 松浦康雄, 森田知比古, 南 雅弘:「高低圧配電系統における需要家端電圧制約下での太陽光発電の導入可能量と導入分布の関係性」平成26年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-14-199, PSE-14-199, 2014年9月24-25日, 大阪府立大学, 堺市

杉原英治:「多数の経済主体が参加する電力ネットワークインフラにおける分散型電源の連系可能容量とその拡大方策」計測自動制御学会第1回制御部門シンポジウム, No.5B3-2, 2014年3月4-7日, 電気通信大学, 調布市

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

杉原 英治 (SUGIHARA, Hideharu)  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 10359854