

EV による電力安定化機能を備えた Smart Grid シミュレーションシステムの構築と評価

唐石 景子[†] 小口 正人[†]

[†] お茶の水女子大学 〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1

E-mail: [†]keiko@ogl.is.ocha.ac.jp, ^{††}oguchi@computer.org

あらまし 現在、環境問題や将来の電力需要増加などの問題の対策として、大規模な自然エネルギー発電の導入が進められている。同時に、電力エネルギーのネットワークを効率的に運用できるスマートグリッドに注目が集まっている。本研究では、スマートグリッド上のエネルギー需給設備として期待されている EV (Electric Vehicle: 電気自動車) に注目する。特に EV のバッテリーを電力源として用いる形態 (V2G: Vehicle to Grid) においては、IT を用いて、EV のバッテリーと充電ステーション間の効率的な電力エネルギーのやり取りを行うことで、グリッド全体の電力の安定化制御を達成することが期待されている。本研究では、スマートグリッドシミュレーションモデルに、必要に応じたエネルギー需給が行える分散型電力源として EV を組み込むことで、グリッド全体の電力の安定化制御を効率的に行う手法をシミュレーションによって評価できるシステムを構築し、動作や振舞いを評価する。

キーワード スマートグリッド, V2G, OpenDSS, EV

Evaluation of Smart Grid system with power stabilization by EV

Keiko KARAISHI[†] and Masato OGUCHI[†]

[†] Ochanomizu University

2-1-1 Otsuka, Bunkyo, Tokyo, 112-8610, Japan

E-mail: [†]keiko@ogl.is.ocha.ac.jp, ^{††}oguchi@computer.org

1. はじめに

現在、世界的な環境問題や将来の電力需要の増加などが問題視されており、それに対し省エネ対策が必要とされ、大規模な自然エネルギー発電の導入が進められている。ただし、自然エネルギーを大量導入すると、さまざまな問題が発生する。そもそも電気には貯めにくいという性質があり、現状の電力管理では需要側にあわせて発電量を調整する必要がある。しかし自然エネルギー発電は出力変動が大きいので、その発電量が読めず調整が難しいといわれている。これらの問題を解決する技術としてスマートグリッドが期待されている。

一方、EV (Electric Vehicle: 電気自動車) はスマートグリッドと深い関係にある。EV は大容量のバッテリーを備えており、これを走行のためだけでなく、必要な場合にはバッテリーからスマートグリッドに対して電力を供給する分散型電力源として用いる V2G (Vehicle-to-Grid) の形態が期待されている。

ただしこのような電力網の形態は、発電所からエンドユーザまで一方向に電気が送られるだけの従来のものとは大きく異なっている。電力源が非常に細かい単位で分散しており、さら

に送電の向きが双方向となる場合もある。そのような場合、グリッドの出力が安定するように、きめの細かい制御をする必要がある。すなわちグリッド上の各地点の電位をモニタし、情報をやり取りして、分散した電力源の出力を調整するような操作が必要である。

そこで本研究では、スマートグリッドに EV を電力源として接続した場合の制御に関して、シミュレーションにより評価することができるシステムについて検討を行う。本論文ではまず、電力網のシミュレーション環境を構築し、ここに太陽光発電所や EV のバッテリーを接続して行った場合の、電力網に対する影響の評価を行う。具体的には、電力網に接続された太陽光発電所の出力を変化させ、各地点における電圧の変化を観測する。その上で、放電させる EV を決定するアルゴリズムをいくつか用意し、EV の配置を変えることによって得られる電力安定化効果の程度について評価する。

本論文の構成は以下の通りである。まず第 2 節では本研究の背景となる、スマートグリッドと EV の概要について述べる。次に第 3 節ではシステム全体の構成について紹介する。第 4 節では、シミュレーション環境で使用する配電網のモデルや、EV

や太陽光発電所の実装方法についての概略を説明する．そして第 5 節ではスマートグリッドに EV を電力源として接続した場合の制御について、シミュレーションにより検証を行う．第 6 節ではまとめと今後の課題について述べる．

2. 研究背景

2.1 スマートグリッド

スマートグリッドには明確な定義はなく、広義として、電力エネルギーのネットワークを効率的に運用することが可能な賢い電力系統を指す．特徴としては、自然エネルギーの大量導入が可能であること、エネルギーがグリッドの双方向に流れること、エネルギーだけでなく情報のやり取りも行うこと等が挙げられる．エネルギー、テレコミュニケーション、IT などの産業が融合して生まれてきたものである．

スマートグリッドの概略図を図 1 に示す．図 1 は文献 [1] を参考として作成したものである．図 1 において、電力の流れを緑の線で、IT による制御を青の線で表している．現在の発電網は発電所から各家庭、ビルに電気を供給している．スマートグリッドにおいては、大規模な風力発電所や太陽光発電所を加え、また各家庭やビルにおいて太陽光パネルを設置し、グリッド上に双方向に電力を流すことを考えている．これにより、豊富な電力をグリッドに取り入れることが可能になるが、そのままではグリッド上の電力量が不安定になることが懸念される．そこで、スマートグリッドの特徴である IT による制御を行う．グリッドに接続された管理センターにより各地の電力状態を把握し、エネルギー不足であれば発電を促進する、逆にエネルギーが余った状態になればグリッドに接続された貯蓄設備に蓄電する、といったグリッドの電力が安定化する制御を行う．以上のように、複雑化する電力の流れを IT による制御で安定させる技術がスマートグリッドである．

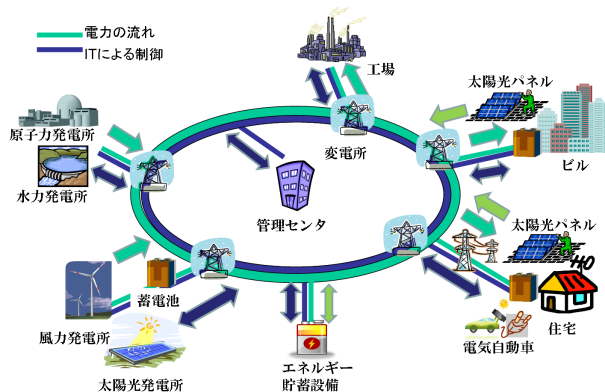


図 1 スマートグリッド概略図

2.2 EV とスマートグリッド

次に、スマートグリッドにおける EV の利用形態に着目する．EV (Electric Vehicle) とは電気を動力源とし、モーター等の電動機により走行する電気自動車を指す．コンセントから差込プラグを用いて、直接バッテリーに充電できる．本研究においてはこの EV を中心に据えて研究をすすめていく．大容量で高性能なものが求められるので、バッテリーが高価であるという欠点

はあるが、エネルギー費用が抑えられるという面を持ち、環境問題への対策に貢献することから、今後広く普及していくことが期待されている．

しかし、EV が普及していくためには、給油所に代わって、各地に充電インフラを設置していく必要があり、その上、EV が消費する電力は大きく、普及に比例して管理すべき電力が肥大化する問題が生じる．これにより、巨大な電力ネットワークが必要となるが、これにスマートグリッドを利用することで、分散的に配置された充電インフラの管理を適切に行うことが可能となる．

2.3 エネルギー需給設備としての EV

ここまで、EV とスマートグリッドの関係について考察してきたが、ここでさらに、エネルギー需給設備としての EV に注目する．近年、EV は単なる自動車としてではなく、必要に応じたエネルギー需給が行える蓄電池としての利用が期待されている．スマートグリッド研究において V2G という言葉をキーワードに、この考えは広まってきている．EV の普及が進むにつれ膨大な量のバッテリーが各地に分散することになるが、前述の充電インフラを通して、EV のバッテリーの電力量の管理が行えるため、グリッド上の電力が不足した場合は、EV のバッテリーから余分な電力を放出し、逆にグリッド上の電力が飽和しそうな場合は、EV のバッテリーに蓄電する、といったようにグリッド全体のエネルギーを調節することが可能となる．

以上で説明したように、このシステムには IT を用いたエネルギーの安定化制御が不可欠となっている．しかし、ここで注視すべきは、EV はグリッド上に自由に移動するため、グリッド上の電力量がダイナミックに変動する問題である．また、固定の蓄電池を接続した場合と比べて制御が複雑化してしまうことや、過度に充放電を繰り返すことで起きるバッテリーの摩耗問題についても大きな課題となっている．

本研究においては、この部分を研究対象とする．本論文ではスマートグリッドに EV を電力源として接続した場合の制御について、シミュレーションにより評価を行う．そこで、太陽光発電所の出力や放電を行う EV の台数を変更した様々なパターンを用意し、それぞれにおいて検証を行った．

3. システム構成

3.1 電力システムシミュレータ

実験環境として、総合的な電力システムシミュレータ OpenDSS (Open Distribution System Simulator) [2] を使用した．使用する配電網において指定した箇所に、リソース (ライン、バス、発電所、変電所、レギュレータ、キャパシタ等) を配置、電力網の状態を管理・分析することができ、また、時間別に各リソースの設定を変更することも可能である．

3.2 構築したスマートグリッドシミュレーションシステム

構築したシステムの構成図を図 2 に示す．本システムは、EV や発電所など配電網の設定を行い、各地の電力潮流の計算を行う OpenDSS に、電力状況データの管理や EV の放電の仕方など、各地の電力安定化のため適切な指示を行う電力管理システ

ムを追加する．この2つのシステムを連携させることにより，スマートグリッドのシミュレーションシステムを構築した．

電力管理システムは，電力安定化指示をスムーズに行うため，配電網上のEVの情報を収集，管理している．その上で更に，各地の電圧の理想値を保持しておき，実際の各地の電力状況を収集する度にどのくらい各地で理想値と差が生じるかを検証する．その値を元に，ユーザの選択したアルゴリズムに従って放電するEVを決定し，放電指示を行う．ユーザは各地の状況やこのアルゴリズムを自由に変更することにより，様々なシミュレーションを行うことが可能となる．

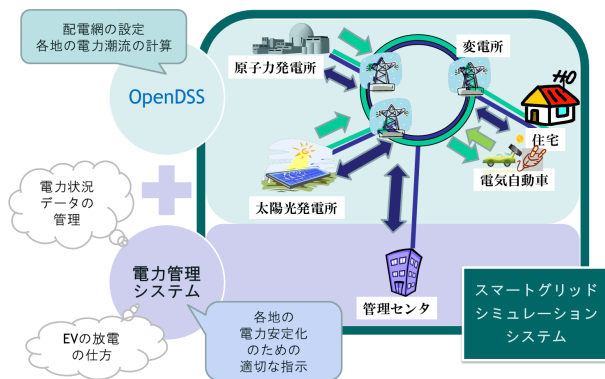


図2 システム構成

4. 実験内容

4.1 配電網モデル

先に挙げたスマートグリッドシミュレーションシステムを用いて実験を行うが，その際，評価対象のグリッドモデルとしてIEEE PES(Power & Energy Society) [3] より提供されている8500-Node Test Feeder(図3)を用いる．これは8500個のノードを持つ，10～15[km] 四方の配電網モデルである．既定の負荷によってパワーフローを算出する．このモデルは，三相交流方式の安定電源(115kV, 3000MVA)，上流から下流まで115[kV] → 7.2[kV] → 120/240[V] と変圧していく変電所，電圧変動を滑らかにするレギュレータやキャパシタ等がグリッド上の各地に接続されている．また，各末端(120/240[V])の送電方式は単相3線式であり，末端の負荷はそれぞれ0.005～93.73[kW]といった値になっている．グリッド全体としては10773[kW]の負荷がかかっており，これは全末端である2354軒分の家庭の使用電力を意味する．

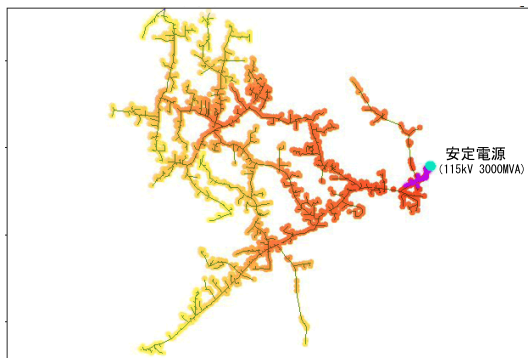


図3 8500-Node Test Feeder

4.2 実験環境

4.1節で述べた配電網のモデルに，7.2[kV]の地点の一箇所(最大出力規模2400[kW]である太陽光発電所を，120/240[V]地点の各末端1177ヶ所にはEVを配置する．これは，全家庭の50[%]はEVを所有していることを意味する．グリッド上の電力が不安定になった場合，家庭に接続されているEVのバッテリーから電力を充放電することによって，グリッド全体の電力を安定化させる．今回，電力安定化に利用する充放電インフラとしては，この家庭用の充放電器のみを利用する．このモデル図を図4に示す．なお，本実験において使用するEVは容量25[kWh]のバッテリーを搭載し，全て充電済みであるものとして，出力は全て2[kW]と設定した．

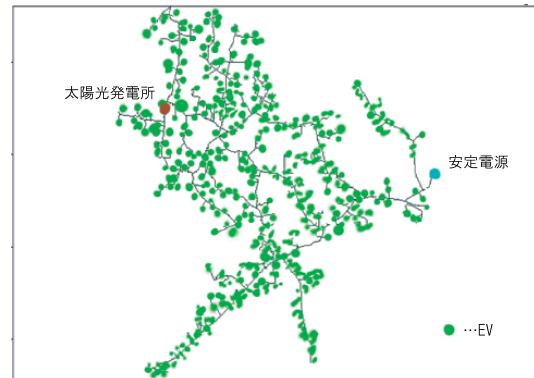


図4 実験環境

4.3 EVの放電による電圧安定化

また，実験の前に，時間帯別の利用可能なEV数についても調査を行った．本来EVは輸送手段として用いられるため，今回の実験において，電力安定化に用いるものは，輸送手段として使われていない，家庭に接続されているEVのみとする．また，簡単化のため，主な用途として自動車は通勤に使用されるものと仮定し，検証を行った．

時間帯別の，家庭に接続されているEVの概数を設定するため，National Household Travel Survey(NHTS 2001 [4])，Federal Highway Administration(FHWA [5]) より公表されているデータをそれぞれ参考資料として利用した．図5，図6はそれぞれ，時間帯別の自動車の帰宅時間帯，出勤時間帯の統計を表したものである．

これらを参考に，1日における時間帯別の「家庭に接続されているEVの割合」を算出したものを図7に示す．グラフから，日中には外に出ているEVが多く，夜中は使用されていないEVが多いことがわかる．算出した時間帯別の利用可能なEVの値をシステムに組み込み，各地の電圧降下をどの程度食い止めることができるか実験を行った．

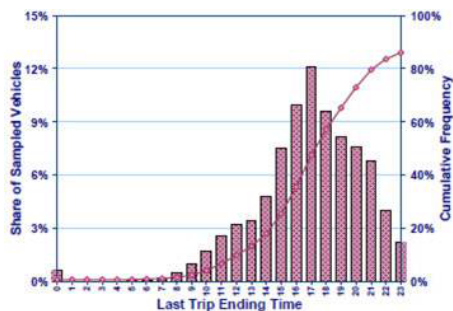


図 5 時間帯別の帰宅した車の割合

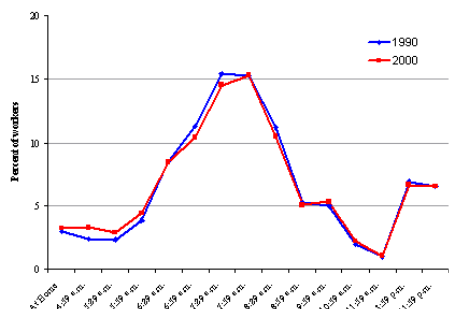


図 6 勤労者の出勤時間帯の割合

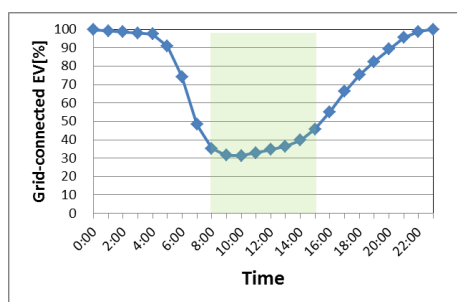


図 7 時間帯別の家庭に接続されている EV の割合

4.4 実験概要

本実験では、天候の悪化により、太陽光発電所からの出力が急減したという状況下で評価を行う。なお、理想状態である晴天時と最も効率の悪い雨天時の太陽光発電所とからの出力を図 8 に示す。この出力曲線は、産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センター [6] が公表している研究データを参考に設定した。天候悪化後の太陽光発電所の出力は 0% まで減少するものとする。太陽光発電所からの出力が減少するとグリッド上で電圧変動が起こることが予想されるが、この時、EV に蓄積されていた電力を放出させることで、太陽光発電所の出力変動分を補い、グリッド全体の電圧調整を行うことを考える。

8 時から 15 時までの時間帯における太陽光発電所からの出力変動によるグリッド全体の電圧変動を観察するため、より末端に近い変電所である 7.2[kV] → 120/240[V] 変電所地点の 1177ヶ所で電圧値を観察した。更に、管理システムがグリッド上の電力が不足していると判断した際に、どのような電力安定化アルゴリズムを選択するかによって、どの程度各地の電圧値に差が見られるか評価を行った。

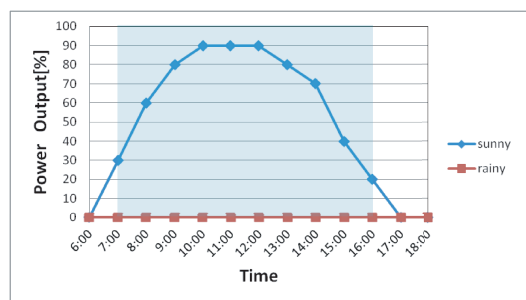


図 8 時間別の太陽光発電所の発電効率

4.5 設定した電圧安定化アルゴリズム

管理システムには予め各地の電圧の理想値として、太陽光発電所が 4.4 節で示した晴天時の出力を行った際の各地の電圧値をそれぞれ設定した。EV の放電が必要か否かを判定する際には、グリッド各地の電圧値が、太陽光発電所の理想の出力を行った際の各地の電圧値を基準に、下限が -5[V] 以上の範囲に収まることを目標とする。これは、日本における法律（電気事業法施行規則）において、標準電圧が 100[V] の際、問題が起こるのは $101[V] \pm 6[V]$ を超えたときという規定を参考に制定した。

また、EV による電圧安定化を行う際、放電する EV を決定するアルゴリズムを 2 パターン用意し、検証を行った。1 つ目は EV 放電地点をランダムに決定するもので、2 つ目は適正範囲値から大きく外れている地点から順に優先的に EV を放電するというものである。これにより、EV の放電位置によってどの程度各地の電圧に差が生まれるか検証を行い、効率的な電力安定化の手法はどのようなものかを確認する。

5. 実験結果

5.1 晴天時と雨天時の太陽光発電所の出力差によるグリッド上の電圧変動

本節においては、晴天時と雨天時の太陽光発電所の出力差によるグリッド上の電圧変動について調査するため、120/240[V] 変電所 1177ヶ所で電圧値を観察した。この天候の変化によって生じる電圧差がどの程度あるのかを検証し、EV の放電によって電圧差分を補う。

図 8 から、晴天時の発電効率を表す曲線と雨天時の発電効率 0[%] ラインの出力差が生じるのは、7:00 から 16:00 の間であることがわかる。そこで、この時間帯別の天候変化による電圧差分を本シミュレーションシステムによって算出した。

電圧差分が適正範囲内に収まっている地点数の割合を時間帯別にまとめた表を表 1 に示す。天候悪化時には太陽光発電所からの出力が 0 となるため、各地の電圧値は降下する。特に、8:00 ~ 15:00 の時間帯においては、適正の範囲内よりも下回ってしまう地点があることが分かった。したがって、8:00 ~ 15:00 までの時間帯において、EV による電力安定化を図る必要がある。

表 1 電圧差分が適正範囲内に収まっている地点数の割合

時間	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
適正範囲内に収まった割合[%]	100.0	82.9	63.4	57.4	57.4	57.4	57.4	68.3	96.8	100.0

5.2 EV をランダムな地点で放電させた時の各地の電圧変動

本節では、5.1 節で検証した天候による各地の電圧降下を EV によって緩和させる実験を行う。なお、本実験において使用する EV は、ランダムに配置されているものとする。本実験においては、悪天候時のグリッド上の電圧降下をどの程度緩和させることが可能か、120/240[V] 変電所 1177ヶ所で電圧値を観察した。本実験では、電力安定化に用いることができる EV 数は変動する。また、利用可能な EV は全て放電を行うものとする。

5.1 節の結果に基づき、8:00～15:00 までの時間帯においての検証を、本シミュレーションシステムによって行った。結果を図 9～図 16 に示す。

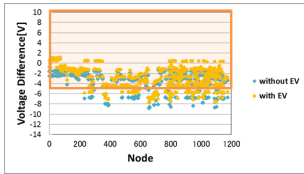


図 9 8 時の電圧差分

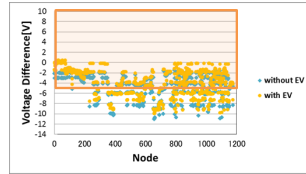


図 10 9 時の電圧差分

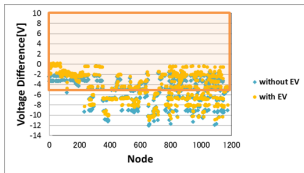


図 11 10 時の電圧差分

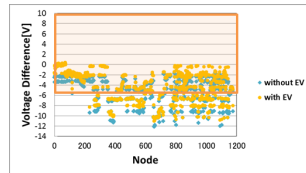


図 12 11 時の電圧差分

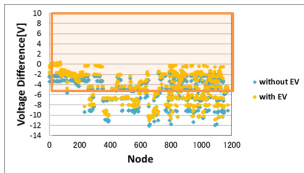


図 13 12 時の電圧差分

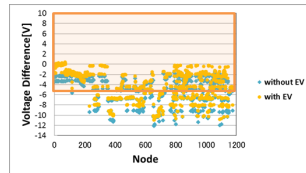


図 14 13 時の電圧差分

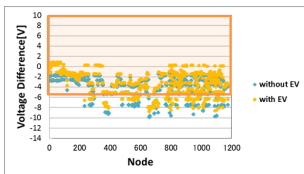


図 15 14 時の電圧差分

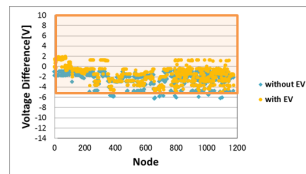


図 16 15 時の電圧差分

図 9～図 16 において、グラフの横軸は電圧を観測している 1177ヶ所の地点を表し、縦軸は電圧の変動量 [V] を表す。橙色で示した範囲が、通常状態である晴天時の電圧値を基準として、グリッド各地の電圧値との差分が-5[V] 以上である電圧の適性値の範囲を示す。青色で示したものは、5.1 節で求めた悪天候時の電圧降下分であり、黄色で示したものが、今回求めた悪天候時に EV を放電させた際の各地の電圧の値と、通常状態である晴天時の各地の電圧値との差分である。

これらのグラフから、EV からの放出を行うことで、全地点で電圧降下を緩和することができていることがわかる。しかし、

僅かしか電圧上昇が見られないことから、各 EV の配置を変更することで上昇幅を増やすことが可能であるが次節で検証していく。

5.3 EV を放電させる地点を選別した時の各地の電圧変動

本節では、5.2 節と同じ条件下で、使用する EV の配置のみ変更した時に、天候による各地の電圧降下を EV によってどの程度緩和させることができるか実験を行う。EV を配置する位置としては、5.1 節において、適正範囲よりも値が下回っていると判断された地点に設定する。結果を図 17～図 24 に示す。

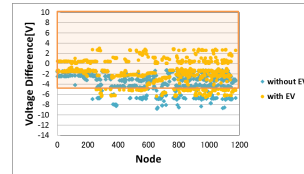


図 17 8 時の電圧差分

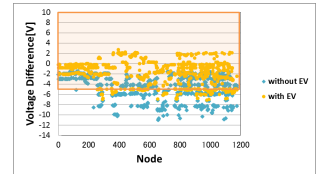


図 18 9 時の電圧差分

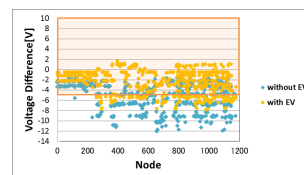


図 19 10 時の電圧差分

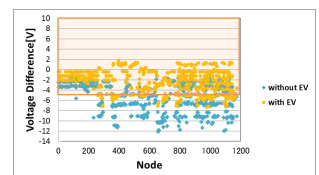


図 20 11 時の電圧差分

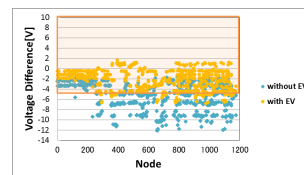


図 21 12 時の電圧差分

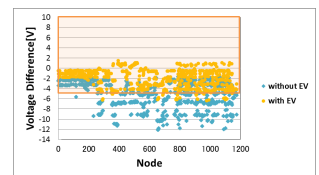


図 22 13 時の電圧差分

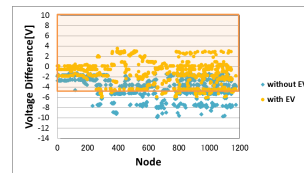


図 23 14 時の電圧差分

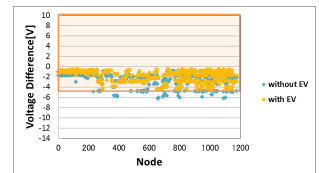


図 24 15 時の電圧差分

図 17～図 24 において、グラフの横軸は電圧を観測している 1177ヶ所の地点を表し、縦軸は電圧の変動量 [V] を表す。橙色で示した範囲が、通常状態である晴天時の電圧値を基準として、グリッド各地の電圧値との差分が-5[V] 以上である電圧の適性値の範囲を示す。青色で示したものは、5.1 節で求めた悪天候時の電圧降下分であり、黄色で示したものが、今回求めた悪天候時に EV を放電させた際の各地の電圧の値と、通常状態である晴天時の各地の電圧値との差分である。

これらのグラフから、電圧差分が多く生まれている地点に関しても適正範囲まで電圧を上げることができていることがわかる。このことから、適正範囲を下回っている地点を狙って EV を放電させることで、効率的に各地の電圧を上昇させることが出来るということが分かった。

5.4 考 察

放電を行う EV の配置の変化によって、悪天候時の電圧降下の緩和がどの程度可能であるかまとめたものを表 2 に示す。

表 2 EV の出力量別の電圧差分が適正範囲内に収まっている地点数の割合の変化

時間	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
EVなし	82.9	63.4	57.4	57.4	57.4	57.4	68.3	96.8
EV(ランダム)	92.1	67.6	65.0	65.0	65.1	65.0	89.8	100.0
EV(選別式)	81.5	82.7	78.9	85.6	93.1	96.7	94.4	100.0

この表は、悪天候時において、EV を接続しない場合、EV を放電させる位置をランダムとした場合、選別した場合のそれぞれの状況において、通常時との電圧差分が適正範囲内に収まっている地点数の割合を表したものである。各 EV の放電によって、適正範囲に収まる地点が増えていっていることがわかる。また、電圧降下が激しい地点で EV を放電させる選別方式においては、電圧差分が規定範囲内に収まる割合が大きく上昇していることから、効率的に各地の電圧を安定化することができていることが分かる。本シミュレーションシステムを用いることで、効率的に電力安定化を行える手法を確認することができた。

しかし、今回システムに組み込まなかった時間別の状況変化は多く存在すると思われる。例えば今回の設定において、各家庭の負荷は固定していたが、時間帯によって家庭の負荷も変化することが考えられる。また、他にも短時間、短距離で移動する EV や、充電が必要な EV の存在など様々な要因で状況が変わることが考えられる。更に、本実験において、EV の普及率は 50[%] に固定したが、今後は EV の普及率についても様々な変化させより実環境に近いシステムを構築し、検証を行う必要がある。

6. まとめと今後の課題

本論文では、グリッド上の複雑な電力の流れを IT による制御で安定させるスマートグリッド、およびエネルギー需給設備として期待されている EV に注目して研究を行った。EV とスマートグリッド間の効率的な電力のやり取りについてシミュレーションを行うため、電力網のシミュレーション環境を構築し、ここに太陽光発電所を接続して、通常時と悪天候時の各地の電圧変動について検証した。更に、構築した配電網上に、様々な条件下で EV を配置し実験を行い、どのような振舞となるか観察した。その結果、すべての時間帯および地点において、EV のバッテリーから放電させた事により、天候の変化に伴う電圧降下の緩和を観測した。また、電圧降下が激しい地点で EV を放電させる選別方式においては、電圧差分が規定範囲内に収まる割合が大きく上昇していることから、効率的に各地の電圧を安定化することができていると言える。本シミュレーションシステムを用いることで、効率的に電力安定化を行える手法を確認することができた。

グリッドに EV のバッテリーを接続して分散電力源として用いる場合、その接続する場所により、各地のグリッド上の電圧は変化する。従って、そのようなグリッドにおいて安定した電力供給を行うためには、グリッド上の各地点をモニタし、情報をやり取りしてきめの細かい制御を行うスマートグリッドの環境

が必須であると言える。

本実験においては、一日の時間別の太陽光発電所の出力変動と EV の使用状況のみを変化させ検証を行ったが、今後はより実環境に近いシステム構築に向け、様々なグリッドの電力変動の要因をシステムに組み込んで行く必要がある。また、現在は電圧値のみに着目し電力安定化を行なっているが、今後は各地の電力値や電流値、無効電圧値などといった要素も考慮したアルゴリズムを設定可能にするなど、利便性や操作性の向上を狙った機能を実装し、評価を行う。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を頂いたトヨタ IT 開発センター Onur Altintas さん、東京大学生産技術研究所 Sekyung Han さんに深く感謝致します。

文 献

- [1] 次世代エネルギーシステムに係る国際標準化に関する研究会、次世代エネルギーシステムに係る 国際標準化に向けて、経済産業省、2010
- [2] OpenDSS <http://sourceforge.net/projects/electricdss/>
- [3] IEEE PES <http://www.ieee-pes.org/>
- [4] National Household Travel Survey <http://nhts.ornl.gov/>
- [5] Federal Highway Administration <http://www.fhwa.dot.gov/>
- [6] 独立行政法人産業技術総合研究所 太陽光発電工学研究センター <http://unit.aist.go.jp/rcpvt/ci/index.html>