道路交通網と電力系統の連成シミュレーション

Microscopic Simulation of Coupled Traffic and Electric Grids

内田 英明 ^{*1} 藤井 秀樹 ^{*1} 吉村 忍 ^{*1} Hideaki Uchida Hideki Fujii Shinobu Yoshimura

> *1東京大学大学院工学系研究科 School of Engineering, The University of Tokyo

Realization of a sustainable low-carbon society is required globally, and energy consumption reduction derived from fossil fuels has been emphasized. In the transportation sector, which accounts for a large percentage of energy consumption, EVs with high environmental performance has been popularized and it is important to use renewable energy for its charging effectively. In this research, we proposed a coupled simulation model that can represent interactions between transport and electric power systems. Since the charging event is coupled to the electric power system mechanism, the spread of EVs will affect not only the road transport network but also the electric power system. As a result of the numerical experiments, it was implied that the concentration of low-output charge after returning home might cause a voltage drop in the distribution system. This phenomenon became more prominent as the penetration rate of EV increased, and the possibility that it deviates from the legal range of the reference voltage is shown in some scenarios.

1. はじめに

持続可能な低炭素社会の実現は世界的な要請である. 温室 効果ガスの排出量の多くはエネルギー起源二酸化炭素によって 占められていることから,化石燃料由来のエネルギー消費を低 減することが重要視されるようになっている.エネルギー消費 において大きな割合を占める運輸部門においては,近年環境性 能の高い電気自動車(Electric Vehicle: EV)が注目を集めて いる.航続距離の短さや充電設備(Charging Station: CS) の未整備により現状の普及率は1%未満に留まるが[1],多く の国において,税制優遇やガソリン車の将来的な製造中止など EV への転換の機運が高まっている.ただし,EV の普及に伴 い化石燃料の消費が増大してしまうことは本末転倒であり,充 電には太陽光・風力・水力といった再生可能エネルギーが利用 されることこそが本質的である.

再生可能エネルギーの動向に目を向けると,太陽光発電 (Photovoltaics: PV)と風力発電の導入量が大きな割合を 占めている [2]. これらは天候により大きく出力変動する電源 であり,大量に電力系統に連系すると系統運用上の問題,例え ば余剰電力による配電系統の電圧上昇や周波数変動等の課題 が指摘されている.余剰発生時においては変動電源の出力抑制 が実施されるが,低炭素化の取り組みを念頭に置くと回避すべ き事象であることは明らかである.対策の一つとしては電力貯 蔵技術が挙げられており,その有力な候補のひとつとして EV が系統の安定化に資するものと期待されている.

このように、低炭素社会の実現に向けては EV が大きな役 割を果たすと考えられており、その際には再生可能エネルギー を有効に利用することが重要である.これまでガソリンを燃料 として自動車が走行している道路交通網と、主に出力制御可能 な電源によって維持されていた電力系統は互いに影響しあうこ とは考えられなかったが、今後普及していく EV を介して相 互作用が発生することが予想される.

このような将来の課題は常に不確定性を内包しており、厳密



図 1: 交通-電力系統 連成シミュレーションの概念図

な解決は困難であることから,有力な方法論のひとつとしてシ ミュレーションによるアプローチが採用される.しかし,これま での検討の多くは道路交通網,ないしは電力系統のどちらかに 着目したものであり,双方のメカニズムにまたがる相互作用に ついては十分なシミュレーションモデルの開発がなされてこな かった.そこで,本研究ではこれらの2つのメカニズムをモデル 化し,相互作用を表現可能な連成シミュレーションモデルを構築 する.道路交通のメカニズムの表現には著者らが開発したマル チエージェント交通シミュレータ ADVENTURE_Mates[3][4] を使用する.本研究では新たに電力系統のメカニズムを表現す るための潮流計算コードを開発し,CSオブジェクトを介して 相互のモデルを連成する.モデルの全体像を図1に示す.続い て,この連成効果が大きいと考えられる配電系統網における電 圧不安定化現象を再現し,交通状況が系統に対してどのような 影響を及ぼすかを明らかにする.

2. 電力系統モデル

2.1 電圧不安定現象

電力系統は供給量(発電量)と需要量(負荷)が均衡し同時 同量が達成さることで正しく機能するため、時々刻々変化する

連絡先:内田英明,東京大学大学院工学系研究システム創成学 専攻,〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 工学部 8 号館 423 室,03-5841-1864,uchida@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp

需要に対し供給量が適切になるよう制御する需給調整機能が備 わっている.これは種々の観測だけでなく事前に策定される需 要予測と運転計画・設備投資によって達成される.EVの充電 需要規模は普及に合わせて徐々に拡大していくと考えられるた め,現状の需給調整機能では系統に大きな影響を与える可能性 がある [5].

EV の充電需要が系統に与える影響としては,電圧不安定現 象が考えられる.これは現在導入量が拡大している再生可能エ ネルギーの出力変動によって既に顕在化しており,現状再生可 能エネルギーは需要家側において系統連系していることから特 に低圧配電系統において顕著である.需要拡大により電気の流 れが増すと需要家側の電圧が低下するが,系統電圧の適正範囲 内での維持は系統運転上の基本的事項であり,電圧調整設備や 調相設備により安定化を図る.EV の充電による新たな需要に 起因する電圧不安定化のリスクに対応するには,運用目標電圧 の見直しや電圧調整設備・調相設備の新規整備が必要となる.

2.2 潮流計算

電力系統の運用・計画のために系統内部各所の電圧や電線・ 変圧器を流れる電力の分布を把握することは重要であり,その 基礎的な分析が潮流計算である.電力系統は交流回路であり, 原理的には交流回路計算と同等である.回路計算は電圧源・電 流源を所与とし,回路内のノード電圧・ブランチを流れる電流 を計算することである.潮流計算の場合には,次の3つの条 件を与えることで解が定まる.「系統構成」は発電機,変圧器,送 電線のインピーダンス及びアドミタンス,「運用条件」は発電 機や負荷における電圧,有効電力,無効電力など,計算の拘束 条件に該当する.

2.3 Backward Forward Sweep 法

一般に潮流計算に用いられる手法には Newton-Raphson 法 [6] や Fast Decoupled 法 [7] がある.これらは主に高圧の送電 系統を中心に適用されてきたが、放射状のトポロジーを持つ配 電系統においては悪条件であるほか、配電系統のように路線 の抵抗がリアクタンスに対して無視できない大きさである場 合には収束性が悪化する.しかし近年は分散電源の増加など に伴い配電系統の潮流計算の必要性が指摘されるようになって いる. そこで本研究では、配電系統における潮流計算手法とし て Backward Forward Sweep 法 [8][9] を採用する.本手法は 電流計算に対応する Backward Sweep と電圧計算に対応する Forward Sweep を繰り返し,得られる電力値が収束すること で出力とする.本手法は系統構成が木構造であることを前提と することで状態変数を低減し,送電系統に比べてノード数が多 く計算負荷がクリティカルである配電系統に特化した高速計算 である. 配電系統のように路線の抵抗がリアクタンスに対して 卓越する場合においても収束性が良好であることが知られて いる.

Backward Forward Sweep 法は以下の通り3つのプロセス によって成り立っている.初めに、ある反復ステップ k にお いて、k-1 ステップで得られた各ノードの有効電力・無効電力 の損失分を系統上流に掃き出していく Backward Sweep であ る.式 1,2 が対応する.ここで P は有効電力,Q は無効電 力,V は電圧である.また R はブランチの抵抗,X がリアク タンスである.r は s に対して上位のノードであることを表す. Backward Sweep ではキルヒホッフの法則より、ノードに流 れ込む電流の総和は等しくなるため、下位から上位へ重ね合わ せることで全ノードの電流が計算でいる、続いて式3に示す Forward Sweep である.Backward Forward Sweep 法では最 上位ノードをスラックノードとし,基準電圧及び位相角0を 与える.そして最上位から系統下流へ掃き出していくことで, 反復ステップkにおける電あるが求まる.これを式4に示す 打ち切り精度で終了することで系統が収束する.

Backward Sweep: 電流計算

$$P_s^k = P_r^{k-1} + \frac{R\left\{(P_r^{k-1})^2 + (Q_r^{k-1})^2\right\}}{(V_r^{k-1})^2}$$
(1)

$$Q_s^k = Q_r^{k-1} + \frac{X\left\{ (P_r^{k-1})^2 + (Q_r^{k-1})^2 \right\}}{(V_r^{k-1})^2}$$
(2)

Forward Sweep: 電圧計算

$$V_r^k = V_s^k \left(1 - \frac{P_s^k R + Q_s^k X}{(V_s^k)^2} + j \frac{Q_s^k R + P_s^k X}{(V_s^k)^2} \right)$$
(3)

電圧の収束条件

$$V^k - V^{k-1} < \epsilon \tag{4}$$

3. 交通-電力連成モデル

道路交通網のメカニズムと電力系統のメカニズムという異な る2つのインフラシステムが存在し,EVを介して影響するこ とを考える場合,これを連成現象として捉えることは自然であ る.本来,連成現象とは複数の場の方程式によって表現される 現象が互いに相互作用するより複雑な現象のことであり,物理 シミュレーションの分野において一般的な概念である.本研究 において,道路交通のメカニズムは車両挙動に関わる意思決定 と相互作用による社会的なふるまいのモデルであることから, 系の挙動を陽に記述することは困難であり,マルチエージェン トシミュレーションにより可能解・近似解を得る.一方電力系 統のメカニズムは系統の潮流分布を電力方程式を解くことで解 析するものであり,手法の適用範囲内においては支配方程式の 厳密解が得られる.

道路交通のメカニズムを表現する交通シミュレーションに は ADVENTURE_Mates を採用し、入力データとしては地図 データと車両発生に関わる OD データが与えられる. このう ち地図データには配置される CS の座標情報や普通・急速充電 の種別が追加される. OD データには EV の発生を定義する必 要がある. これらの結果として車両の走行ログや排出ガスデー タの他に, EV の充電イベントが発生する. この充電イベント が負荷として電力シミュレーションに連成境界条件として与え られる.

電力系統のメカニズムを表現する電力シミュレーションに は潮流計算を採用する.入力データとしては系統構成・設備定 数・運用条件が与えられる.ここで道路交通網との連成境界と なる系統上の CS の位置を指定する必要がある.また,動的運 用条件として EV の充電需要と PV の出力を取得する.この うち, EV の充電需要は電力シミュレーション内の1ステップ 毎に交通シミュレーション側の出力を取得する.これらを基に 潮流計算を実行し,出力として送電線の電力・ノード電圧・位 相角を得る.モデルの詳細を図2に示す.

4. 数值実験

4.1 実験設定

連成シミュレータを利用し,道路交通網のメカニズムが電 力系統に与える影響として電圧不安定現象の解析を実施する.



図 2: 連成モデルの詳細



図 3: 配電系統モデル

道路交通網は和歌山市中心部のネットワークとし,図5に示 すとおり2017年1月現在の急速充電器配置と任意の普通充電 器を追加した.ノード数1470・リンク数1346,急速充電器の 設置された CS は13箇所であり,収容台数は各5台,出力は 全て150kWである.普通充電器の設置された CS は21箇所 であり,収容台数を無制限,出力は全て3kWである.また, 車両発生台数は交通量調査の結果を基に推定しており,普及 率に応じて EV に置き換えることとする.本実験では10%刻 みで10%~50%の5通りとする.EV の充電残量(State of Charge: SoC)は30%~80%の範囲でランダムである.

また,電力系統は図3に示す配電系統を仮定する.ここで は電圧・電流などの不平衡は考慮せず,全て単相回路と仮定し 解析を行う.無限大母線から101V相当の電力が送り出される 潮流条件とし,世帯ごとの負荷のプロファイルとPVの出力は 図4とする.PVの普及率は10%刻みで10%~30%の4通り とし、力率0.95で全てのノードに均等に分布するものとする.

連成境界条件として, CS での充電負荷を配電系統にマッピングする.本実験では特に EV 等の影響が大きいと考えられる市街地として図5に示すエリアAとBに着目し,各エリア内の普通充電器の負荷と PV は配電系統の全てのノードに均等に,急速充電器の負荷は末端のノード8に集中して分布するものとした.

CS での負荷は事前に指定された充電器種別や出力の他に, EV エージェントの SoC に応じて変動する定電圧定電流(constant voltage constant current: CVCC)方式 [10] に基づい て決定される. EV の電池として登載されるリチウムイオン電 池には充電電流及び電圧に関して制限があり,充電初期には 電流,終期には電圧の制約が卓越する.従って,これらを一定

The 32nd Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2018



from	to	R [p.u.]	X [p.u.]	Y/2 [p.u]
1	2	0.00324	0.00393	0.0001
2	3	0.02579	0.04413	0
3	4	0.02579	0.04413	0
4	5	0.02579	0.04413	0
5	6	0.02579	0.04413	0
6	7	0.02579	0.04413	0
7	8	0.02579	0.04413	0



図 4: 世帯の日負荷曲線モデル(実線:有効電力,破線:無効 電力)と晴天時の PV 出力モデル

値以下とするために充電による SoC の増加量は時間変化する. また、ここで決定された負荷には充電器の力率として 0.95 が 考慮され電力系統に対する運用条件が定まる.

以上より,シミュレーション条件は EV 普及率(5通9)× PV 普及率(4通9)の 20 ケースとなる.11 時~21 時まで の 10 時間を対象とし,交通シミュレーションは $\Delta t = 0.1$ 秒, 電力系統シミュレーションは $\Delta t = 1$ 分の設定とした.電力シ ミュレーションは充電器の負荷と PV の発電出力を 1 分毎に 更新し,逐次潮流計算を実行する.

4.2 実験結果

図 6~8 に実験結果の一部を示す. 各図中の縦軸は電圧, 横軸 はノード番号であり, 12 時~21 時の各時間断面における電圧 分布をプロットしている. 電気事業法により定められた 100V 系の基準電圧は 101 ± 6V の範囲である. 両エリア内に目的 地を持ち普通充電器によって目的地充電を行う EV エージェン ト数は概ね同程度だが, エリア B には 2 箇所の急速充電器が 存在し, エリア内の交通量も大きいため, 経路充電の頻度は相 対的に高い.

普通充電器による影響

交通シミュレーションにおいては, EV の普及率の上昇に合わせて充電イベントの発生回数も増加する.普通充電器の出力



図 5: 和歌山市中心部の道路ネットワーク



図 6: エリア A: EV10%/PV10%

- 図 7: エリア B: EV50%/PV20%
- 図 8: エリア B: EV10%/PV30%

は3kW と図4に示す平均的家庭の1日の最大出力に対して2 倍程度であるものの,長時間の充電により同一エリア内で次々 と充電イベントが重なった結果として,大きな電圧降下の要因 となっている.図6において,帰宅時間帯と夕方の電力使用 ピークが重なることで影響がより大きくなっていることがわ かる.

急速充電器による影響

普通充電器と同様, EV の普及率が高まることによって充電 イベントの発生回数は増加するが,150kW という高出力であ ることから充電時間はごく短く,結果として任意の時間断面に おいて同一エリア内で充電イベントが重複する可能性は高くな い.ただしエリア B においては近接して 2 箇所の急速充電器 が存在する上,どちらも周辺交通量が大きく,従って時間帯に よってはノード 8 に顕著な電圧低下がみられ,しばしば基準 電圧を逸脱する結果となった.図7 においては 20 時のノード 8 の電圧が 92V まで低下していることが観察できる.

PV の普及による影響

全体的な傾向として日射量が多く発電出力の高い 12 時にお いて,逆潮流による電圧上昇が確認できる.図8において顕 著である.ただしこの影響は基準電圧を逸脱するほどのもので はない.また,ここまで述べた通り EV の充電需要集中によ り発生する電圧低下は,帰宅時間帯と夕方の電力使用ピークが 重なることによって発生しているが,PV 出力の多い昼間とは かい離があり互いに打ち消しあうような現象は発生しないこと がわかる.

5. まとめ

本研究では、低炭素社会の実現に向けた流れとして EV の 普及を背景とした交通網と電力系統間の相互作用に着目し、両 システムにまたがる課題を一元的に扱う連成シミュレーション モデルを開発した.著者らの開発した ADVENTURE_Mates と電力系統モデルを接続し、EV が電力系統に与える影響とし て電圧不安定現象の解析を実施した.

既存研究においては EV の挙動を均一に扱い,道路交通網の メカニズムを考慮しなかったため,本研究では現実の道路ネッ トワークと配電系統を模擬した連成シミュレーションを実施 し,EV の充電行動がどのような影響を及ぼすか複数のケース についてパラメトリックスタディを行うことが可能となった. 今後は制御機器の導入されたより現実的な配電系統を対象と し,系統及び EV の充電行動を制御することによるリスク回 避の可能性について検討することが重要である.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 15H01785 の助成を受けたものであ る.ここに記して謝意を表する.

参考文献

- International Energy Agency: Global EV Outlook 2017, 2017.
- [2] Bloomberg New Energy Finance: New Energy Outlook 2017, 2017.
- [3] H. Fujii, H. Uchida, and S. Yoshimura: Agent-based Simulation Framework for Mixed Traffic of Cars, Pedestrians and Trams, Transportation Research Part C, Vol. 85, pp. 234-248, 2017.
- [4] 4. 内田 英明,藤井 秀樹,吉村 忍:マルチエージェント交通シミュレーションにおける充電を考慮した EV の経路選択,人工知能学会論文誌, Vol. 32, No. 5, pp.AG16-I_1-9, 2017.
- [5] International Energy Agency: Energy Technology Perspectives 2017, 2017.
- [6] W. F. Tinney, and C. E. Hart: Power flow solution by Newton's method, IEEE Transactions on Power Apparatus and systems, Vol. 11, pp. 1449-1460, 1967.
- [7] B. Stott, and O. Alsac: Fast decoupled load flow, IEEE transactions on power apparatus and systems, Vol. 3, pp. 859-869, 1974.
- [8] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, and G. X. Luo: A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks, IEEE Transactions on power systems, Vol. 3, No. 2, pp. 753-762, 1988.
- [9] G. X. Luo, and A. Semlyen: Efficient load flow for large weakly meshed networks, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4, pp. 1309-1316, 1990.
- [10] C. C. Hua, and M. Y. Lin: A study of charging control of lead-acid battery for electric vehicles, Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 1, pp. 135-140, 2000.