

電気自動車を介した交通と電力網の相互作用シミュレーション

Interaction Simulation between Transportation Network and Power Grid via Electric Vehicles

内田 英明*¹
Hideaki Uchida

藤井 秀樹*¹
Hideki Fujii

吉村 忍*¹
Shinobu Yoshimura

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

Some auto mobile companies started to introduce their own electric vehicles (EVs) into the Japan market in 2009. However, their widespread adoption is hindered by a plurality of different factors in comparison with gasoline vehicles, i.e. short cursing distance, expensive purchase price, lack of charging stations and long charging time. In this study, we propose a new simulation model in consideration of the impact on traffic phenomenon by newly implementing EVs agent and charging stations object into microscopic traffic simulator. In addition, although electric power flowing only in an electricity network is able to move within the transportation network in future, it has not been discussed for the interaction between these two infrastructure systems having different characteristics intermediated by EVs. We also discuss the impact possibly occurring when EVs become common by interacting traffic simulator and the simulator of the power grid.

1. はじめに

近年、道路交通セクターにおける低炭素化・省エネルギー化の要請が高まっているなかで、2009年より電気自動車(以下、EVという)の市場導入が開始された。国内の総エネルギー消費量のうち23%を運輸部門が占め、そのうち乗用車・バスで90%にのぼることから[経産省2015]、EVの更なる普及が期待されている。しかし、通常のガソリン車と比較した際の航続距離の短さや購入価格の高さ、充電ステーション(以下、CSという)の少なさ、充電時間の長さといった課題が残っており、これらの解決に向けて多くの研究・開発がなされている。

EVは交通網の一要素であると同時に電力系統においても一定の役割を果たしていくことが予想される。しかし、交通と電力という性質の異なるインフラシステム間において、EVを媒介として発生する相互作用については依然として明らかとなっていない部分も多い。そこで本研究では、交通・電力系統の各シミュレーションモデルを相互作用させ、EVの普及に伴う影響を定量的に評価可能なシミュレータを開発する。

2. 交通シミュレーション

従来、交通シミュレータではガソリン車の車両挙動を前提とした現象を再現してきた。しかし、EVにはいくつかの点でガソリン車と異なる挙動が想定されるため、普及の進んだ状況を模擬することは困難であると考えられる。そこで本研究では、著者らが開発してきたマルチエージェント交通流シミュレータMATES[Yoshimura 2006][藤井 2013]に実装されたEVエージェントを改良し、交通現象にEVが与える影響を考慮可能なモデルを提案する。

2.1 運動方程式による消費電力量

一般にEVの航続距離は短く、走行における意思決定に充電残量が与える影響は大きいと考えられる。また、車両の減速にかかる力を電池の充電に充てる機能である回生ブレーキの影響を考慮する必要もある。EVにはギアチェンジが存在しない

ため、その仕事量は式(1)に示す運動方程式によって精度よく推計できることが知られている[兵藤 2012]。このとき、右辺の各項は順に転がり摩擦抵抗・慣性抵抗・空気抵抗・勾配抵抗・電装品等の消費を表す。ここで、 m は質量[kg]、 g は重力加速度[m/s²]、 v は速度[m/s]、 a は加速度[m/s²]、 τ は転がり摩擦係数、 θ は勾配、 k は回転部慣性質量係数、 ρ は空気密度[kg/m³]、 C_d は空気抵抗係数、 A は前面投影面積[m²]である。

$$F = ((F_{rol} + F_{int} + F_{aer} + F_{gra}) \cdot v + F_{acc}) \cdot \Delta t$$

$$\begin{cases} F_{rol} = \tau m g \cos \theta \\ F_{ine} = (1 + k) m a \\ F_{aer} = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \\ F_{gra} = m g \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

ただし、実際の消費電力量には機械損失が加味されるほか、充電残量(以下SOCという)による性能の劣化や回生ブレーキによる影響も知られている[Zhang 2015]。そこで各々の影響について式(2)のとおり考慮することとする。ここで、 η は機械損失率、 B は変換効率、 R は回生率、 SOC は充電残量、 α はSOC依存係数である。

$$E = \begin{cases} \frac{1}{\eta} F \cdot C(soc) & F \geq 0 \\ \eta F \cdot R(v) & F < 0 \end{cases}$$

$$C(soc) = (1 - \alpha) SOC + \alpha$$

$$R(v) = \begin{cases} 0.5 \times \frac{v}{5} & v < 5 \\ 0.5 + 0.3 \times \frac{v - 5}{20} & v \geq 5 \end{cases} \quad (2)$$

2.2 充電を考慮した経路選択

EVは一定以上の距離を走行する場合、CSを経由する必要がある。また、ガソリンの補給と比較し充電には多くの時間を要することから、EVユーザの選択する経路は経由地候補となるCSの待ち時間を考慮したものでなくてはならない。そこで、経路

選択におけるコストを消費電力量に設定し、2 地点間の最小消費電力経路探索問題として定式化する。この問題は任意の地点への無充電到達判定として解釈することが可能である。

本研究では Bellman-Ford 法を基にした経路選択を提案する。これは EV の特徴である再生エネルギーを考慮した場合、リンクコストが負になる可能性が生じるためである。また、到達性の判定のため、アルゴリズム 1 に示した通り、出力される経路の全ての地点において消費電力が EV の充電容量 capacity を超過しないよう制約条件を付加したアルゴリズムとする。

アルゴリズム 1

```
#1 初期化
nodes.consumption = infinity
origin.consumption = 0, origin.predecessor = null

#2 緩和操作
while nodes.size-1
for each link ij in links
    i = ij.from
    j = ij.to
    if j.consumption > i.consumption + ij.cost()
        && i.consumption < capacity
            j.consumption = i.consumption + ij.cost()
            j.predecessor = i
```

3. 電力システムシミュレーション

交通シミュレータ上の EV の電力消費と、それに伴う CS での充電をモデル化した電力システムシミュレータを簡易的に実装する。ここでは道路交通セクター以外の電力消費も考慮し、EV の振る舞いがシステム全体に与える影響を取り扱うことが可能である。太陽光発電をはじめとした再生可能エネルギー等に対しても拡張可能とし、与えられた電力システムの潮流計算を行うものとする。

3.1 潮流計算

潮流計算とは、母線の電圧や有効・無効電力を制約条件とした電力方程式を解くものである。計算のフローを図 1 左に示す。システムの構成・設備定数及びある時点での運用条件(ここでは各ノードでの負荷)を入力とし、一般に(3)式に示す連立非線形方程式のかたちをとる電力方程式を近似的に解くことで、電力システムの状態を出力する。ここで Y はアドミタンス行列であり、各要素は交流回路における電圧と電流の比である。ここでは厳密解法である交流法を用い、反復計算には Gauss-Seidel 法を採用する。

$$I = YV$$

ここで

$$I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

4. 相互作用シミュレータ

上述した交通・電力システムの各シミュレータを結合した相互作用シミュレーションの概要を図 1 に示す。2 つのシミュレータでは CS の ID を共有している。また、交通シミュレータは時間ステップ 0.1 秒とし、電力システムシミュレータは EV の充電イベントが発生する度に適宜呼び出されるイベントドリブン型で実行されるものとする。交通シミュレータにおいて EV は道路状況・電力システム状況から経路を決定し、逐次消費電力量を算出する。また SOC の低下に伴い CS に移動し充電を開始する場合、充電イベントを送信する。この際、CS の ID と充電中の EV の諸元が同時に

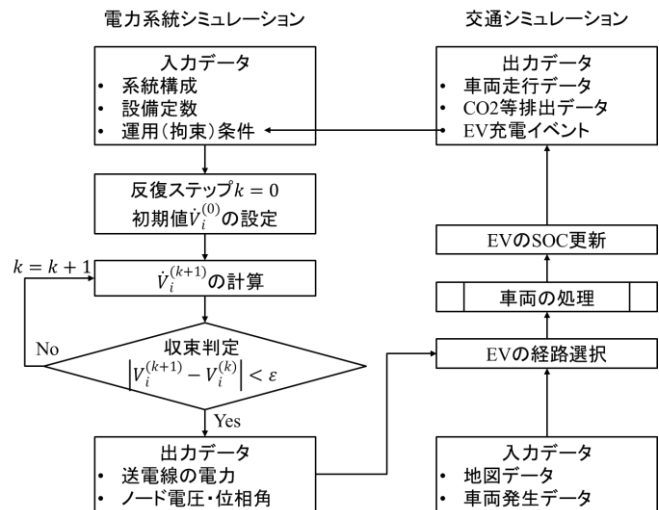


図1 相互作用シミュレーションの概要

送信される。全車両の処理終了後、電力システムシミュレータが 1 件以上の充電イベントを受信していれば、解が収束するまで計算を反復的に計算し、そのデータが電力システム状況として再び交通シミュレータに送信される。

5. まとめ

本研究では EV の普及を想定し、交通シミュレータに消費電力量を算出する EV エージェントを実装した他、CS に立ち寄り充電すること考慮し Bellman-Ford 法に修正を加えたアルゴリズムを提案した。続いて潮流計算を行う電力システムシミュレータを作成し、これらを結合することで交通網と電力システムの相互作用を検討することのできるシミュレータを開発した。

今後は、再生可能エネルギーの導入や EV からシステムへの放電イベントの他、ノードプライスの算出など最適潮流計算を実装し電力システムシミュレータを拡張することを考える。ノードプライスとは負荷の変化で生じるシステムの追加コストを地点ごとに割り当てる考え方であり、これを交通シミュレータの入力とすることで、交通網・電力システム双方にとって合理的なシステムの設計を目指す。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 15H01785 の助成を受けたものである。

参考文献

- [経産省 2015] 経済産業省: 平成 26 年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書 2015), 2015.
- [Yoshimura 2006] S. Yoshimura. MATES: Multi-Agent Based Traffic and Environment Simulator - Theory, Implementation and Practical Application, CMES: Computer Modeling in Engineering and Sciences, Vol.11, No.1, pp.17-25, 2006.
- [藤井 2013] 藤井 秀樹, 吉村 忍, 鈴村 将史: 現実的な車両間相互作用に基づく電気自動車の交通流シミュレーション, 電気学会論文誌 C, Vol.133, No.9, pp.1687-1693, 2013.
- [兵藤 2012] 兵藤 哲朗, 渡部 大輔, 橋本 太夢: 電気消費特性からみた電気自動車エコドライブ方策の考察, 交通工学, Vol.47, No.4, 2012
- [Zhang 2015] R. Zhang, et al.: Electric vehicles' energy consumption estimation with real driving condition data, Transportation Research Part D, Vol.41, pp.177-187, 2015.