

走行中ワイヤレス電力伝送における 必要送電電力の簡易計算法

竹内 琢磨[†] 郡司 大輔^{††} 居村 岳広^{†††} 堀 洋一^{†,†††}

[†] 東京大学大学院新領域創成科学研究科 〒 277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

^{††} 日本精工株式会社 〒 251-8501 神奈川県藤沢市鶴沼神明 1-5-50

^{†††} 東京大学大学院工学系研究科 〒 277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

E-mail: [†]takeuchi15@hflab.k.u-tokyo.ac.jp, imura@hori.k.u-tokyo.ac.jp, hori@k.u-tokyo.ac.jp,
^{††}gunji-d@nsk.com

あらまし 電気自動車の航続距離延長手法として、走行中の電気自動車へ路面に設置された送電設備から非接触で電力伝送を行う走行中ワイヤレス電力伝送が注目されている。走行中ワイヤレス電力伝送においては車両の走行状態に応じて消費電力が変化するため、路面側送電設備の検討においては送電すべき電力の概算が必要である。そこで、本稿では自動車の走行抵抗から実際の走行に必要なエネルギーを算出し、これを用いて路面側からの必要送電電力を算出する簡易な計算方法を示す。これによって任意の場合において必要送電電力の算出が可能になり、走行中ワイヤレス給電を実現するために必要なコストや各効率の検討も可能となる。

キーワード 走行中ワイヤレス電力伝送, 磁界共振結合, 必要送電電力計算

Simplified Calculation Method for Required Transmitting Power of Dynamic Wireless Power Transfer

Takuma TAKEUCHI[†], Daisuke GUNJI^{††}, Takehiro IMURA^{†††}, and Yoichi HORI^{†,†††}

[†] The University of Tokyo, 277-8561, 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, Japan

^{††} NSK Ltd., 251-8501, 1-5-50, Kugenumashinmei, Fujisawa, Kanagawa, Japan

^{†††} The University of Tokyo, 277-8561, 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, Japan

E-mail: [†]takeuchi15@hflab.k.u-tokyo.ac.jp, imura@hori.k.u-tokyo.ac.jp, hori@k.u-tokyo.ac.jp,
^{††}gunji-d@nsk.com

Abstract Dynamic Wireless Power Transfer has been considered as a notable method for improving driving range of Electric Vehicles (EVs). However, a required transmitting power from a road side coil has not been clearly indicated. Therefore, we propose a simplified calculation method for required transmitting power. This method calculates required transmitting power of a road side coil using requisite energy of a driving EV derived from driving resistance. By using this method, required transmitting power of a road side coil can be calculated on arbitrary cases. Therefore, investigation on required costs of road side construction or efficiency of each part can be done.

Key words Dynamic Wireless Power Transfer, Magnetic Resonance Coupling, Required Transfer Power Calculation

1. はじめに

近年、環境性能の高さから注目を集めている電気自動車 (EVs) であるが、バッテリー容量による航続距離の制限が問題となっている。この問題の解決案として、走行中の EV に対して路面に設置された送電設備から非接触で電力伝送を行う走行中ワイヤレス電力伝送の研究が数多く報告されている [1]~[4]。更に、走行中ワイヤレス電力伝送を適用した場合に EV の航続距離延

長に対してどれだけの影響があるかについてケーススタディーを行った研究も数多く報告されているが [1]、実際に走行中ワイヤレス給電を実現するために路面側コイル 1 つあたりに必要な送電電力の計算方法を明示した報告はまだない。そこで本稿では、EV の走行中ワイヤレス電力伝送に必要な送電電力を算出するための簡易な計算式を示し、任意の走行状態において必要な送電電力の算出を可能にする。これにより、路面側の送電設備に必要な電気容量や電力伝送や電力変換時の効率につい

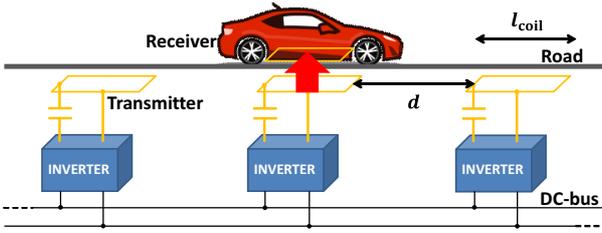


図 1 DC-bus system

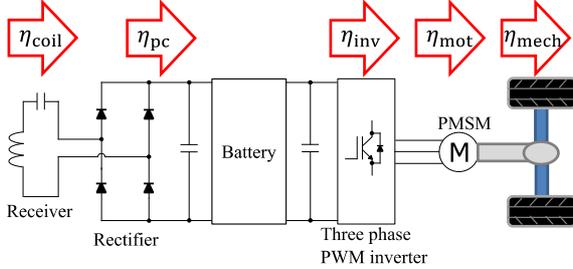


図 2 The receiving side.

でも検討が可能になる。これまでは主に伝送効率の向上[4]や変換器の効率向上が走行中ワイヤレス電力伝送の実現に向けた研究における主流であったが、本検討によって走行中ワイヤレス電力伝送の実現のために必要なコストや各効率の検討が可能になるため、今後の検討の方向性を示すことが可能となる。

2. 走行中ワイヤレス電力伝送システム

図 1 にこれまでに著者らが検討を行ってきた走行中ワイヤレス電力伝送システムの概要図を示す[4]。このシステムの路面側においては、EMI の低減に効果があると考えられている DC-bus 方式を用いている。ワイヤレス電力伝送の共振回路トポロジーには例として SS トポロジーを用いており[5]、この DC-bus からインバータを介して各送電コイルと接続するため大電力伝送が容易であることから、本検討ではこの走行中ワイヤレス電力伝送システムを対象とする。図 2 に車両側回路の構成を示す。車両側の共振回路トポロジーにも SS トポロジーを用いており、簡単のために路面側からの伝送電力を整流器からバッテリーに充電し、そのバッテリー電力で直接モータを駆動する構成とした。

なお、以降の必要送電電力の検討は共振回路のトポロジーには依存せず、あらゆる共振回路トポロジーにおいて用いることができる。

3. 必要送電電力計算法

走行中ワイヤレス電力伝送において必要となる路面側コイルの送電電力を概算する計算式を導出する。自動車の走行抵抗からある区間を走行する際に必要となる総エネルギーを算出し、これを用いて路面側から電力伝送する総エネルギーを算出する。最後に、この総エネルギーから路面側コイルの平均的な必要送電電力を算出する。

3.1 走行抵抗 [6]

自動車が走行する際の走行抵抗 R [N] は式 (1) から式 (5) により求められる。

$$R = R_r + R_a + R_s + R_c \quad (1)$$

$$R_r = \mu_r Mg \quad (2)$$

$$R_a = \frac{1}{2} \rho C_d S v^2 \quad (3)$$

$$R_s = Mg \sin \theta \quad (4)$$

$$R_c = Ma \quad (5)$$

ここで、 R_r 、 R_a 、 R_s 、 R_c はそれぞれタイヤの転がり抵抗、空気抵抗、勾配抵抗、加速抵抗であり、 ρ [kg/m³] は空気密度、 C_d [-] は車体形状に応じた係数 (C_d 値)、 S [m²] は前面投影面積、 v [m/s] は車両速度、 μ_r [-] は転がり摩擦係数、 g は重力加速度、 M [kg] は車両重量、 θ [rad] は勾配角である。

3.2 走行に要するパワー・エネルギー

車両がある区間を時刻 0 から T において速度 $v(t)$ で走行している場合、車両が発揮するパワー P_{wheel} とエネルギー E_{wheel} はそれぞれ式 (6)、式 (7) で求められる。

$$P_{\text{wheel}} = R(t) v(t) \quad (6)$$

$$E_{\text{wheel}} = \int_0^T R(t) v(t) dt \quad (7)$$

特に、車両が平坦な道路を速度 V [m/s] で等速走行している場合、勾配抵抗と加速抵抗はともにゼロで走行抵抗は一定値 R であり、 E_{wheel} は次式で求められる。

$$E_{\text{wheel}} = RVT = RL \quad (8)$$

ここで $L = VT$ [m] であり等速走行区間の長さである。

走行に必要な駆動エネルギーに対してワイヤレス電力伝送されたエネルギーに過不足があると、車載バッテリーが充放電される。電気自動車に搭載されたバッテリーの総エネルギー量を W [J]、ある区間を走行した後の W に対する充電割合 (SOC : State of Charge) の変化量を ΔSOC [-] で表すと、バッテリーに充電されるエネルギー E_{charge} は次式で表される。

$$E_{\text{charge}} = W \Delta\text{SOC} \quad (9)$$

実際の車両においては、図 2 に示すように駆動系の効率やワイヤレス給電の伝送効率を考慮する必要がある。車載バッテリーの出力から車輪で発揮される駆動力までの効率 η_{DT} は次式で表される。

$$\eta_{\text{DT}} = \eta_{\text{inv}} \eta_{\text{mot}} \eta_{\text{mech}} \quad (10)$$

ここで η_{inv} は駆動モータを駆動する PWM インバータの効率、 η_{mot} は駆動モータの効率、 η_{mech} は減速機や伝達要素の機械効率である。また、路面側送電設備から車載バッテリーまでの効率 η_{WPT} は次式で表される。

$$\eta_{\text{WPT}} = \eta_{\text{coil}} \eta_{\text{pc}} \quad (11)$$

ここで η_{coil} はワイヤレス電力伝送におけるコイル間効率、 η_{pc} は整流回路等の電力変換回路の効率である。これらの各効率は実際には動作状態に応じて変化するが、概略検討においては平均的な代表値を用いることとする。

以上の各効率を考慮すると、車両が必要とするエネルギーに

対して路面側送電設備から伝送するエネルギー E_{road} は次式で求められる。

$$E_{\text{road}} = \frac{1}{\eta_{\text{WPT}}} \left(\frac{E_{\text{wheel}}}{\eta_{\text{DT}}} + E_{\text{charge}} \right) \quad (12)$$

3.3 敷設率

道路のある区間において、区間の全長に対して路面の送電設備が敷設されている比率を敷設率 D と定義する。ここで、路面の送電設備として図 1 に示すようなコイルの構成を想定し、1 つのコイルの長さを l_{coil} [m]、コイル間の間隔を d [m] とすると、敷設率 D は次式で求められる。

$$D = \frac{l_{\text{coil}}}{l_{\text{coil}} + d} \quad (13)$$

3.4 路面側設備の必要送電電力

ある区間を走行する車両に路面側送電設備から伝送するエネルギー E_{road} は式 (12) で求められる。ここで、ある区間の走行に要する時間を T [s] とすると、路面側送電設備の平均的な必要送電電力 \bar{P}_{road} は

$$\bar{P}_{\text{road}} = \frac{E_{\text{road}}}{TD} \quad (14)$$

であり、特に長さ L [m] の区間において速度 V [m/s] で等速走行している場合は次式で求められる。

$$\bar{P}_{\text{road}} = \frac{E_{\text{road}}V}{LD} \quad (15)$$

式 (14) より、敷設率 D が低いほど必要な送電電力が大きくなることが分かる。

4. 等速走行における計算例

本章では傾斜のない道路を等速走行する場合を想定し、路面側コイルの必要送電電力等を算出した計算例を示す。各計算においては特に記載がない限り走行区間長 $L = 10$ km、敷設率 $D=50\%$ 、走行速度 80 km/h の場合についての計算結果である。車両パラメータは市販 EV の諸元を参考として表 1 に示す値を用いた。なお、車両重量に関しては燃費計試験の条件に準じて体重 55kg の 2 名乗車を想定しており、等価慣性重量は考慮していない。

4.1 走行に要する電力

車両の走行速度 V に応じた所要パワー P_{wheel} の計算結果を図 3 に示す。式 (1)、式 (6) より等速走行においては走行抵抗 R は V^2 、パワー P_{wheel} は V^3 の関数であることが分かる。図 3 より、 80 km/h の等速走行に要するパワーはおよそ 9.14 kW であることが分かる。

4.2 車両速度に対する必要送電電力

車載バッテリーの電力を使わずにワイヤレス電力伝送された電力のみで等速走行する場合、路面側送電設備から送電すべきエネルギー E_{road} は式 (12) において $E_{\text{charge}} = 0$ として求めればよい。さらに、路面側からの平均的な必要送電電力 \bar{P}_{road} は式 (15) により求められるので、式 (15) に式 (12) を代入すると次式が得られる。

$$\bar{P}_{\text{road}} = \frac{RV}{\eta_{\text{WPT}}\eta_{\text{DT}}} \quad (16)$$

表 1 Simulation parameters.

Air density ρ	1.2 kg/m ³
C_d value	0.30
Frontal projected area S	2.0 m ²
Total weight M	1590 kg
Rolling resistance coefficient μ_r	0.015
Slope angle θ	0 deg
Averaged coil to coil efficiency η_{coil}	90 %
Rectifire efficiency η_{pc}	95 %
$\eta_{\text{WPT}} = \eta_{\text{coil}}\eta_{\text{pc}}$	85.5 %
Three phase inverter efficiency η_{inv}	95 %
Electric motor efficiency η_{mot}	90 %
Mechanical components efficiency η_{mech}	95 %
$\eta_{\text{DT}} = \eta_{\text{inv}}\eta_{\text{mot}}\eta_{\text{mech}}$	81.2 %
Total efficiency $\eta = \eta_{\text{WPT}}\eta_{\text{DT}}$	69.5 %

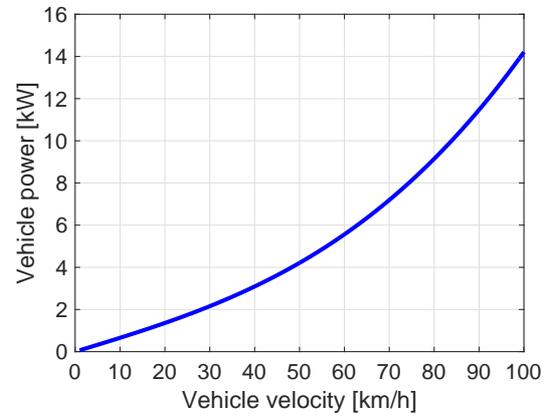


図 3 Power for EV driving.

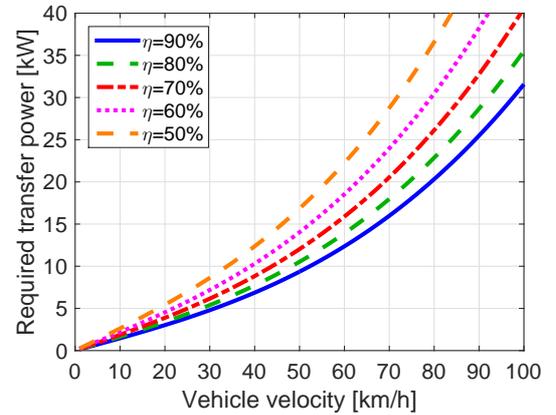


図 4 Efficiency vs. required transfer power.

路面側コイルの敷設率 D が 50% の場合において、車両速度に応じて路面側から送電すべき電力の計算結果を図 4 に示す。ここで総合効率 $\eta = \eta_{\text{WPT}}\eta_{\text{DT}}$ と定義した。例として走行速度が 80 km/h、各効率が表 1 に示す値である場合、路面側からの必要送電電力は 26.4 kW である。

4.3 敷設率に対する必要送電電力

車載バッテリーの電力を使わずにワイヤレス電力伝送された電力のみで等速走行する場合に、敷設率 D に応じた路面側からの平均的な必要送電電力 \bar{P}_{road} は式 (16) で求めることができる。

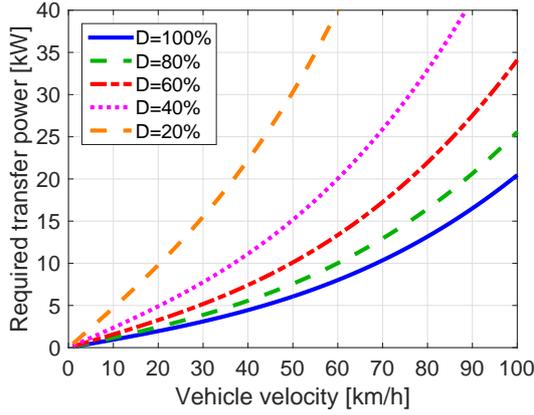


図 5 Vehicle velocity vs. required transfer power ($\eta = 69.5\%$).

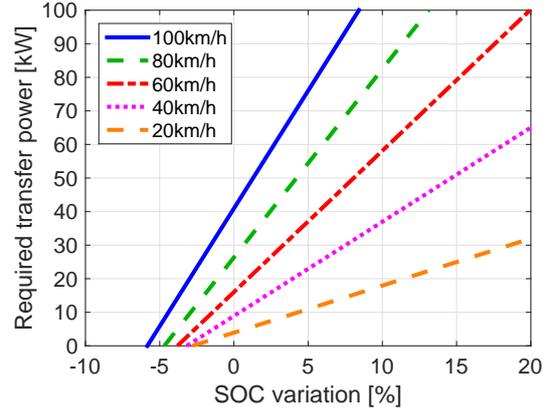


図 7 SOC variation vs. required transfer power.

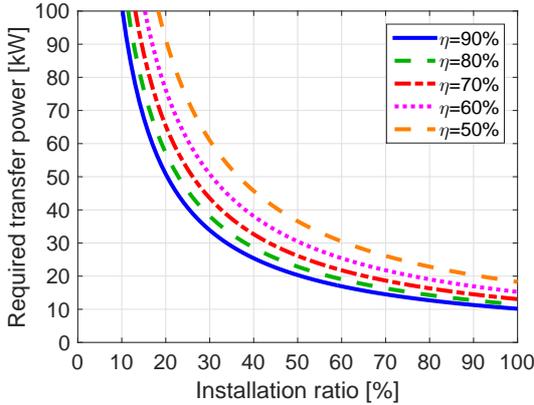


図 6 Installation ratio vs. required transfer power ($V = 80$ km/h).

すなわち、 \bar{P}_{road} は敷設率 D に反比例することが分かる。総合効率を 69.5 % として敷設率を変えて走行速度に応じた \bar{P}_{road} を計算した結果を図 5 に示す。また、走行速度を 80 km/h とし、総合効率を変えて敷設率に応じた \bar{P}_{road} を計算した結果を図 6 に示す。

図 6 および図 5 より敷設率 D が低い場合、必要となる \bar{P}_{road} が極端に大きくなることが分かる。敷設率を高くした場合、路面側の送電設備単体の機器容量は小さくすることができる。例えば、 $D = 100$ [%] の場合、必要送電電力は約 13.2 kW となる。一方、送電設備単体の機器容量を大きくすると敷設率を低くすることができる。送電設備単体のコストは機器容量に依存すると考えられるため、設備単体のコストと走行区間における設置数においてトレードオフの関係となっており、コストを最小とする最適解が存在すると言える。

4.4 SOC 変化量に対する必要送電電力

走行に要するパワーよりも路面からの伝送電力が大きい場合、車載バッテリーを充電しつつ走行することが可能である。等速走行の場合、長さ L [m] の走行区間における車載バッテリーのエネルギー変化量 E_{charge} を実現するための路面側からの必要送電電力 \bar{P}_{road} は式 (12)、式 (15) より次式の通り求められる。

$$\bar{P}_{road} = \frac{V}{LD\eta_{WPT}} \left(\frac{E_{wheel}}{\eta_{DT}} + E_{charge} \right) \quad (17)$$

すなわち、 \bar{P}_{road} は所望のエネルギー変化量 E_{charge} (すなわち SOC 変化量 ΔSOC) に比例する。

表 2 Driving data of JC08 mode.

Average vehicle velocity	24.4 km/h
Max vehicle velocity	81.6 km/h
Driving time	1204 s
Driving distance	8.172 km

ここでは一例として走行区間を 10 km、敷設率を 50 %、車載バッテリーの容量を 30 kWh として、車載バッテリーの SOC 変化量に対する路面側からの必要送電電力 \bar{P}_{road} を計算した。計算結果を図 7 に示す。SOC 変化量が 0 のとき走行に要するエネルギーと路面からの送電エネルギーが釣り合っていることを意味しており、SOC 変化量が負のときは車載バッテリーの充電量低下、正のときは充電量増加を意味している。高速走行において車載バッテリーを充電しつつ走行するためには路面側に大きな送電電力が必要となることが分かる。

5. パターン走行における計算例

本章では、走行速度が時々刻々と変化する場合の一例として、燃費計測における走行パターンの 1 つである JC08 モード [7] における計算例を示す。JC08 モードの走行内容の概要を表 2 に、速度パターンを図 8 に示す。

平地において走行する場合、走行抵抗 R は式 (1) において勾配抵抗 R_g を除く項を求めればよい。JC08 モードの走行速度は 1 秒毎に定められているため、各時系列での加速度は速度データの差分から求めた。また、簡単のため車両の減速はすべてモータの回生による電気ブレーキによるものと仮定した。1 秒間隔の時系列 t における速度を $v(t)$ とすると、 t において車両の走行に要するパワーは次式で求められる。

$$P_{wheel}(t) = (R_r(t) + R_a(t) + R_c(t))v(t) \quad (18)$$

$P_{wheel} \geq 0$ であれば力行状態、 $P_{wheel} < 0$ であれば回生状態である。ここでモータを駆動するインバータに出入りするパワーを考えると、力行状態では P_{wheel} に対して効率分だけ大きなパワーが必要なので、モータを駆動するインバータに入力されるパワー P_{inv} は

$$P_{inv} = \frac{1}{\eta_{DT}} P_{wheel} \quad (P_{wheel} \geq 0) \quad (19)$$

である。一方、回生状態では P_{wheel} に効率を乗じた分がイン

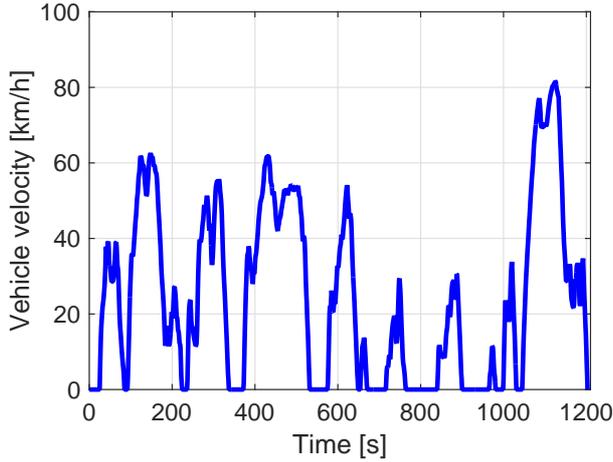


図 8 Driving velocity pattern on JC08.

表 3 Calculation results on JC08.

Required gross energy for a EV driving on JC08 E_{inv}	1.01 kWh
Required gross transfer energy from road side E_{road}	1.18 kWh
Required transfer power ability from road side \bar{P}_{road}	7.05 kW

バッテリーから回生されるので、回生パワー P_{inv} は

$$P_{inv} = \eta_{DT} P_{wheel} \quad (P_{wheel} < 0) \quad (20)$$

であることに注意する。以上を考慮したうえで、1回のパターン走行において車載バッテリーのSOC変化をゼロとするために路面側からワイヤレス電力伝送すべき総エネルギー E_{road} は次式で求められる。

$$E_{road} = \frac{1}{\eta_{WPT}} \sum_{t=0}^T P_{inv} \quad (21)$$

ここで T は走行時間である。したがって、走行区間における路面側送電設備の敷設率を D とすると、路面側送電設備の平均的な必要送電電力 \bar{P}_{road} は次式で求められる。

$$\bar{P}_{road} = \frac{E_{road}}{TD} \quad (22)$$

ただし、走行時間 T は図 8 に示すように停車時間を含んでいることに注意すべきである。

表 1 に示す車両諸元において、JC08 モードの走行パターンを走行するために必要となる路面側送電設備の平均的な送電電力 \bar{P}_{road} を計算した。敷設率 D は 50% とした。モータ駆動用インバータに出入りするパワー P_{inv} の計算結果を図 9 に示す。更に、 \bar{P}_{road} の計算結果等を表 3 に示す。以上の計算結果より、JC08 モードの走行前後において車載バッテリーの充電量を変化させずに走行させるために路面側の送電設備からワイヤレス電力伝送する必要のある電力 \bar{P}_{road} は、約 7.05 kW であることが求められた。

6. 結 言

本稿では電気自動車への走行中ワイヤレス電力伝送を実現す

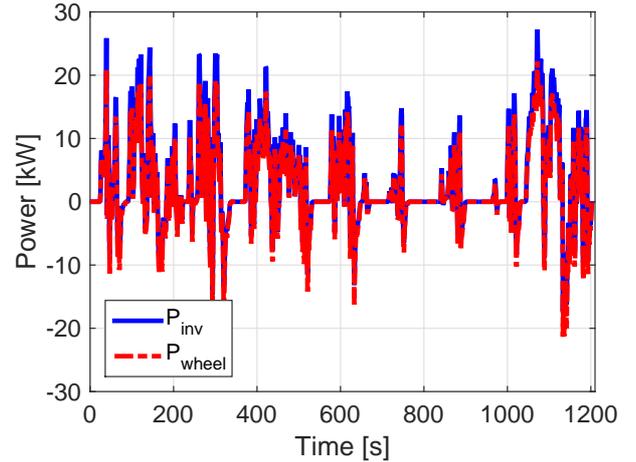


図 9 Required driving power on JC08.

るために、路面側送電設備から伝送する必要のある送電電力の簡易な計算法を示した。自動車の走行抵抗から走行に必要なエネルギーを算出し、これを用いて路面側送電設備からの必要送電電力を算出した。等速走行時およびモード走行における必要送電電力等を計算例として示すことで任意の場合においてこの計算方法が適用可能であることを示した。この計算方法を用いることで、今後の走行中ワイヤレス電力伝送の実現に向けた検討の方向性を示すことが可能になる。

文 献

- [1] Swagat Chopra and Pavol Bauer: "Driving Range Extension of EV With on-Road Contactless Power Transfer—A Case Study," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.60, No.1, pp.329–338, (2013).
- [2] Matthew McDonough: "Integration of Inductively Coupled Power Transfer and Hybrid Energy Storage System: A Multiport Power Electronics Interface for Battery-Powered Electric Vehicles," *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol.30 No.11, pp.6423–6433, (2015).
- [3] Jaegue Shin, Seungypng Shin, Yangsu Kim, Seungyoung Ahn, Seokhwan Lee, Guho Jung, Seong-Jeub Jeon and Dong-Ho H.Cho: "Design and Implementation of Shaped Magnetic-Resonance-Based Wireless Power Transfer System for Roadway-Powered Moving Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.61, no.3, pp.1179–1192,(2014).
- [4] Daita Kobayashi, Takehiro Imura and Yoichi Hori: "Real-time Coupling Coefficient Estimation and Maximum Efficiency Control on dynamic Wireless Power Transfer Using Secondary DC-DC converter," *41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp.783–788, (2015).
- [5] 居村岳広・堀洋一:「電磁誘導方式と磁界共振結合方式の統一理論」, 電気学会論文誌 D, Vol.135, No.6, pp.697–710, (2015).
- [6] 廣田幸嗣・小笠原悟司・舟渡寛人・三原輝儀・出口欣高・初田国之:「電気自動車工学 EV 設計とシステムインテグレーションの基礎」, 森北出版株式会社, 2012 年 7 月 30 日 第 1 版第 3 刷発行.
- [7] 道路運送車両の保安基準の細目を定める告示 [2009.07.30] 別添 42 (軽・中量車排出ガスの測定方法):http://www.mlit.go.jp/jidosha/kijyun/saimokubetten/saibet_042.00.pdf, 2016 年 5 月 16 日.