

第3世代ワイヤレスインホイールモータの開発

藤本博志¹⁾ 清水 修¹⁾ 永井栄寿¹⁾ 藤田稔之¹⁾ 郡司大輔²⁾ 大森洋一³⁾ 大塚拓一⁴⁾

Development of 3rd Generation Wireless In-Wheel Motor

Hiroshi Fujimoto Osamu Shimizu Sakahisa Nagai Toshiyuki Fujita Daisuke Gunji Yoichi Ohmori Takukazu Otsuka

Short cruise range is one of the biggest problems of electric vehicles. To solve this problem, dynamic wireless power transfer is proposed. We developed 3rd generation wireless in-wheel motor which has all components used for dynamic wireless charging and driving, active rectifier, inverter, motor, in the wheel. The inverter and active rectifier adopted novel SiC power devices which are 80% smaller than mass product. The electric vehicle which has two 3rd generation wireless in-wheel motor on rear wheels is also developed. This system achieved 20kW wireless power transfer and 92.5% wireless power transfer efficiency from DC to DC at bench test. Dynamic wireless power transfer is realized in local area with vehicle.

KEY WORDS: EV and HV systems, motor drive system, wireless power transfer, in-wheel motor (A3)

1. 研究の背景

電気自動車の性能的課題として、航続距離が挙げられる。航続距離の伸長にはバッテリーの搭載量を増やすことが効果的ではあるが、バッテリーの搭載量を増やすと車体重量が増えることにより、走行抵抗や加減速にかかるエネルギーが増加し、走行にかかるエネルギーが増大する。走行にかかるエネルギーが増大すると電気自動車の充電にかかるエネルギーが増える。発電には未だ多くの化石燃料を用いているため、走行にかかるエネルギーが増大すると、電気自動車普及の大きな目的である二酸化炭素の削減と化石燃料の使用量削減を実現できなくなり、持続可能でなくなる。

航続距離伸長の技術として走行中給電が提案されている¹⁾。走行中に車両に給電を行うことで、車両に搭載するバッテリーは大きく削減することができ、走行にかかるエネルギーを削減することができる。また、走行中給電は自動車を利用する日中に充電することになるため、太陽光発電の余剰電力を利用することが可能になり、再生可能エネルギーの利用促進に効果がある。走行中給電の方式としては接触式給電²⁾と非接触給電があり、非接触給電では主に電界結合方式³⁾と磁界結合方式⁴⁾が提案されている。

本研究グループでは磁界結合方式を用いた給電システムを持つ、ワイヤレスインホイールモータの研究を進めてきた。第1世代としてボディとホイールの間をワイヤレス電力電送するワイヤレスインホイールモータの開発⁵⁾を行い、第2世代

として、さらに走行中給電の機能を持つワイヤレスインホイールモータの開発を行ってきた。ハードウェア開発のみならず、追加のセンサを利用しないコイルの検知技術⁶⁾や給電開始までの時間を短縮する制御開発⁷⁾、自動運転と強調した制御開発⁸⁾も行われている。またシステムの設計法についての提案⁹⁾も行われている。第1世代、第2世代ワイヤレスインホイールモータのターゲットは小型車両であったため、普通自動車以上の車格に適応するためにはシステムの高出力化が必要である。また第2世代ワイヤレスインホイールモータはユニットサイズによりサスペンションの構造が複雑化しており、レイアウト制約が大きいいため、実用化を考えた場合には更なる小型化を目指す必要がある。

2. 第3世代ワイヤレスインホイールモータの開発

2.1. コンセプト

走行中給電によりバッテリーの重量を減らし、駆動効率の高いインホイールモータと組み合わせることにより、究極のエコカーを目指した。またそれだけではなく、「すべてのタイヤの中に」というコンセプトを立て、受電回路、整流器、インバータ、制御回路、モータという受電から駆動にかかるすべてのコンポーネントをホイール内に納めることを目指し、開発を行った。第3世代ワイヤレスインホイールモータの概観をFig. 1に示す。

第2世代と同様にばね下にコイルを配置している。コイルはアップライトにステアを介して取り付けられている。受電回路、整流器、インバータ、制御回路、モータはホイール内に納められている。さらにラジエータ、ウォーターポンプ、リザーブタンクの冷却系もホイール内に納めているため、冷却水はホイール内のみを回ることとなる。

1) 東京大学(277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

2) 日本精工(株)(251-8501 神奈川県藤沢市鶴沼神明 1-5-50)

3) 東洋電機製造(株)(236-0004 横浜市金沢区福浦 3-8)

4) ローム(株)(615-8585 京都市右京区西院溝崎町 21)

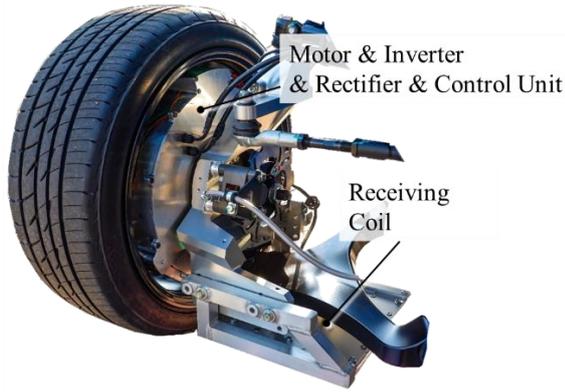


Fig.1 3rd Generation Wireless In-wheel Motor

2.2. 目標車両の設定

ターゲットの車格はCセグメントの5人乗り乗用車である。車両パラメータを Table. 1 に示す。走行抵抗 F_{drive} [N]の算出には式(1)を用いている。

Table.1

Items	Values
Vehicle Total Weight(w_v)	1680kg
a	0.12
b	0.034
Radius of Tire	0.3m
Maximum Acceleration	0.4G
Maximum Speed	150km/h
Maximum Output	100kW

$$F_{drive} = aw_v + bv^2 \quad (1)$$

ここで a は転がり抵抗係数、 b は空気抵抗係数相当の係数、 v は車速[km/sec]である。第3世代ワイヤレスインホイールモータの各コンポーネントは Table. 1 の車両に4台搭載されたときに性能を満足するように設計する。

2.3. システム構成

ワイヤレスインホイールモータのシステム構成を Fig.2 に示す。青枠内の部品がボディ内に納められており、緑枠内の部品がホイールの中に納められている。そして黄色枠内の部分は車両の外の路面側の部品である。

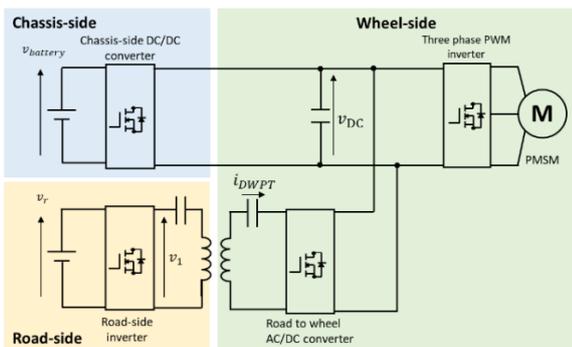


Fig.2 System Configuration

路面から受電した電力はモータ駆動時にはモータで消費され、その余剰電力はDCDCコンバータを通して、電池に充電される。双方向のDCDCコンバータを受電側に設けているため、DCDCコンバータにより受電効率や受電電力を変化させることが可能になる。システム電圧は電池電圧以上、730V以下としている。ワイヤレス給電の周波数は停車中給電の国際規格に合わせ80-90kHzとしている。本研究での評価は85Hzで行っている。

2.4. コンポーネントレイアウト

各コンポーネントのレイアウトを Fig. 3 に示す。適用するホイールサイズはリム径17inch、リム幅7.5Jのホイールである。モータはアウトロータ型ダイレクトドライブとして、ホイール内の空間の有効活用とギアによる伝達効率の低下や応答の低下を根本的に解決することとした。そしてモータのインナーステータと一体となって受電回路、整流器、インバータ、制御回路が取り付けられている。ラジエータ、ウォータポンプ等の冷却系は回路を収めているケースの外側に円周上に取り付けられている。ホイール内の容積の約50%がモータ、残りの50%を他のコンポーネントが占める。コイルはホイールの外に設けられており、コイルと受電回路はリッツ線で接続されている。

3. コンポーネントの開発

3.1. モータ

車両の要求を満たすことができるモータの主要諸元を Table. 2 にまとめる。Table. 2 の最大トルク、最高回転数を算出にするにあたり、タイヤによるスリップや損失、タイヤの変形はないものとしている。ダイレクトドライブであるため、高トルク、低回転型のモータとなっている。トルク出力を向上させるためにアウトロータタイプのSPM(Surface Permanent Magnet)としている。

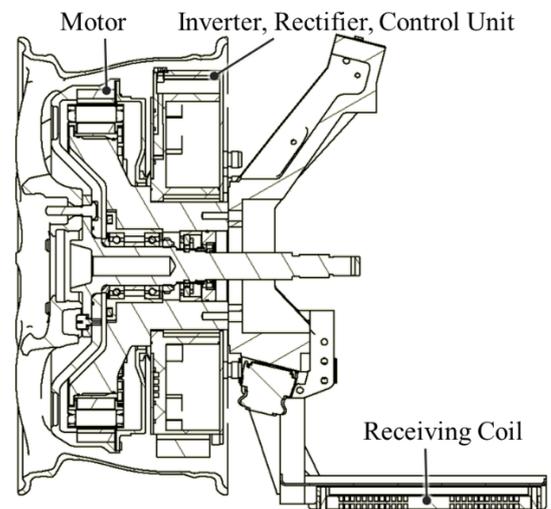


Fig.3 Component Layout

Table.2 Specification of Motor

Items	Values
Maximum Torque	510Nm
Maximum Speed	1330rpm
Maximum Current	91Arms
Outer Diameter	364mm
Height	39
Number of Poles	28
Number of Slots	30

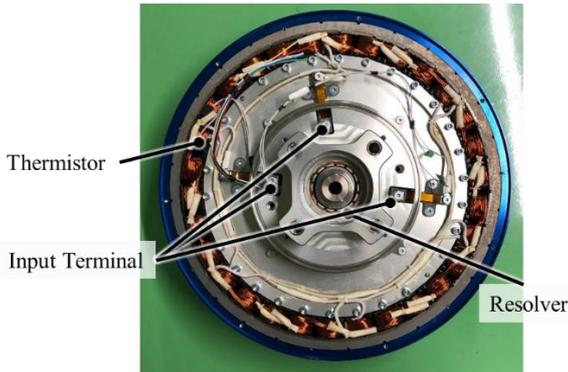


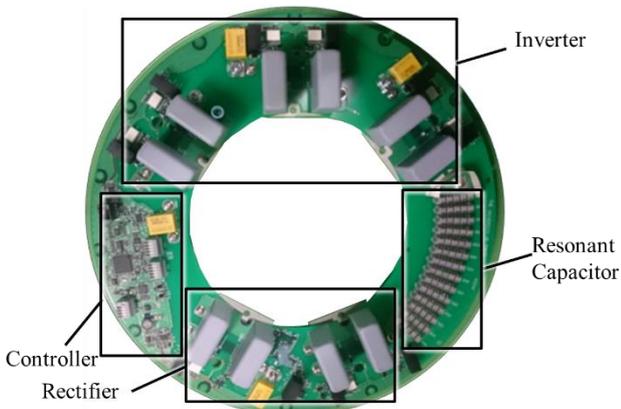
Fig.4 Motor

また分数溝構造とすることで巻線係数を向上させることでトルク向上を狙っている。ホイール内の空間を有効に利用するために出来る限り大径なモータとしている。Table. 2 に示した外径は電磁鋼板の外径である。積厚に対して9倍の直径となる扁平なモータとなっている。モータの構造を Fig. 4 に示す。

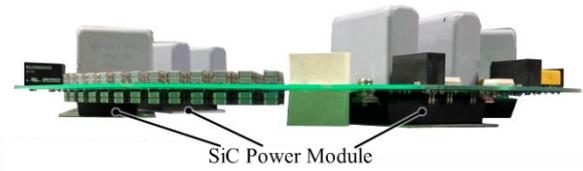
3.2. インバータ・整流器・受電回路

3.2.1. 基板レイアウト

インバータと整流器、充電回路は同一の円環上の基板に配置されている。円環基板を Fig. 5 に示す。またインバータと同期整流器の主要諸元を Table. 3 に示す。



(a) Top View



(b) Side View

Fig.5 Circular-shaped Board

Table.3 Specification of Inverter and Converter

Items	Values
Maximum Current	91Arms
Maximum DC Voltage	730V
Maximum Output(Inverter)	25kW
Carrier Frequency(Inverter)	20kHz
Active Rectifier Frequency	80~90kHz

受電した電力は共振用のコンデンサを通り、その後整流用のSiC(Silicon Carbide)パワーモジュールを通して、DCバスに入る。整流器はパワーデバイスを用いた同期整流器となっているため、電流が流れるタイミングを検知する必要がある。しかし、電流センサには原理的に位相遅れが存在するため、制御の遅れが発生する。そこで、ここでは共振用コンデンサを制御器の近くに配置することにより、コンデンサの電圧検知による同期整流を実現した。電圧センサは検知の遅れを非常に短くできるため、電圧検知による同期整流により、高い受電効率を実現可能である。また、SiCモジュールのスイッチング状態で受電コイルのショート、非同期整流、同期整流のモードを変化させることが可能である。

受電部分を基板下部、インバータを基板上部とすることにより受電から駆動までの電線経路を最短としている。またモータの回転センサ、温度センサ、出力の接続は円環基板の中心部分より出てきた配線で行うため、モータとの接続部分は完全防水された筐体の中で完結している。

インバータに用いているパワーデバイスも同期整流器と同様のSiCのモジュールである。SiCモジュールは全て基板の下面に接続され、アルミ製の筐体にボルトで取り付けられる。インバータの筐体には水冷用の水路が設けてあり、そこでパワーデバイスの冷却を行う。冷却水はインバータのパワーデバイスを冷却し、整流用のパワーデバイスを冷却した後にモータのステータ内面冷却をする。コイルはステータ内面を通して冷却され、磁石の水冷構造は持っていない。パワーデバイスを先に冷却するのはパワーデバイスの耐熱性がモータの部品と比較して低いため、より低い温度の冷却水を用いることが必要なためである。モータから出た冷却水はインバータケースの側面より出た後に、ラジエータ、ウォータポンプを通り、リザーブタンクに入る。

3.2.2. SiC パワーデバイス

円環上にパワーデバイスを配置するためにはパワーデバイスの小型化が必須である。本研究で開発した SiC パワーデバイスを Fig. 6 に示す。量産品と比較して 20% の容積となっている。

モジュール内に複数の SiC チップを並列接続させ、さらに DCDC コンバータではそのモジュールの並列接続を行っている。熱抵抗の低減として、新規開発した基板により、熱抵抗を従来の 60% まで低減することに成功している。

一般に、熱抵抗の低減をするとモジュールの耐久性の低下が懸念される。耐久性確認のために最大 40G の振動試験をモジュール単体で行ったが、モジュールに変化やクラックは見られなかった。また熱衝撃サイクル試験も実施している。熱衝撃サイクル試験の結果を Fig. 6 に示す。縦軸はサイクル試験途中で取り出して一定電流を印加したときのモジュール温度を示し、横軸はサイクル数を示す。

雰囲気気温度から 150°C まで温度上昇させた後 15 分維持し、その後 -40°C まで温度低下させてさらに 15 分維持した後、再度雰囲気気温度まで戻す一連の動作を 1 サイクルとしている。試験前後での変化はなく、問題ないことが確認された。

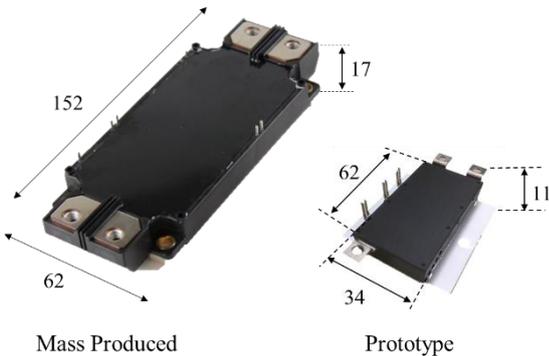


Fig.6 SiC Device

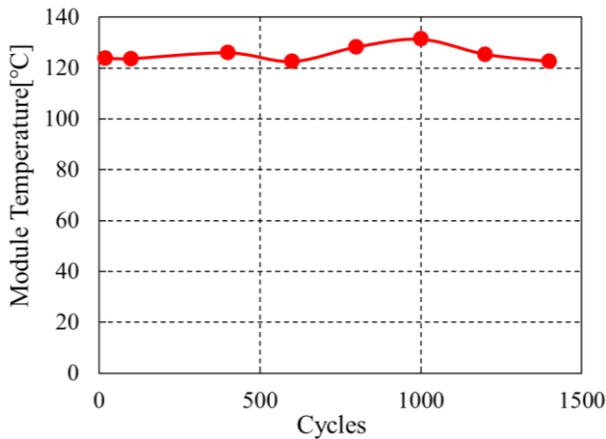


Fig.6 Thermal Shock Test

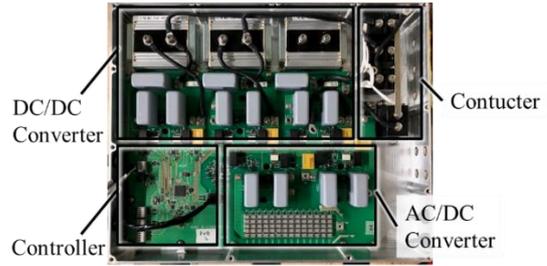


Fig.7 Onboard DC/DC Converter

3.3. 車載 DCDC コンバータ

DCDC コンバータの構成を Fig. 7 に示す。DCDC コンバータにもインバータ、コンバータと同様に SiC のパワーデバイスを使用している。また、同基板内に受電用回路と同期整流器を設けている。これによりボディ側にコイルを配置した場合にも受電も可能となっている。DCDC コンバータの出力可能電圧は入力電圧 ~730V である。

3.4. 送受電コイル

走行中給電の 1 コイル当たりの給電エネルギー量 $E_{dynamic}$ [J] は式 (2) で示すように、給電区間内の平均給電電力 $\overline{P_{WPT}}$ [W] とコイルの車両進行方向への給電可能長さ l_{coil} [m]、コイルを通過する車両平均速度 \bar{v} [m/sec] によって決まるため、給電エネルギー量を増やすためには送電コイルもしくは受電コイルは車両進行方向に長くすることが必要である。

$$E_{dynamic} = \frac{\overline{P_{WPT}} l_{coil}}{\bar{v}} \quad (2)$$

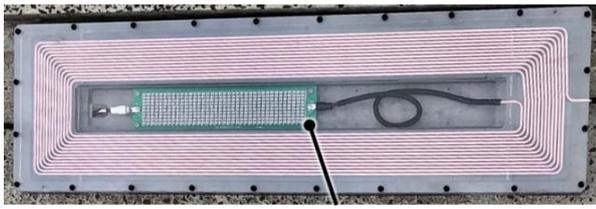
受電コイルの重量増は走行に要するエネルギーを増やすため、送電コイルを大きくし、受電コイルを小型化することが車両の駆動エネルギー削減には重要である。本研究で開発した送電コイルと受電コイルの主要諸元を Table. 5 に示す。ここで示すサイズはコイルケースの外形である。

コイルの抵抗、自己インダクタンス、相互インダクタンスのモデル化を行い、寸法を制約条件とすることで、同時最適化⁹⁾することにより、第 3 世代は第 2 世代と比較して送電コイルの容積を 61% 削減し、受電コイルの容積を 54% 削減した。

送電コイルはフェライトとリッツ線によって構成される。送電コイルを Fig. 7 に示す。送電コイルの内側に共振用のコンデンサを設けている。コイルで発生する電圧は高電圧であるため、制御に電圧を使用するなどの理由がない場合はコイルとコンデンサの距離は絶縁的に短いほど良い。

Table.5 Specification of WPT Coils

Items	Tx Coil		Rx Coil	
	2 nd	3 rd	2 nd	3 rd
Length	1500mm	1086mm	254mm	230mm
Width	490mm	318mm	387mm	230mm
Height	45mm	45mm	37mm	26.5mm
Turns	14	12	28	13
Layers	1	1	1	2



Resonant Capacitor
Fig.8 Transmitting Coil

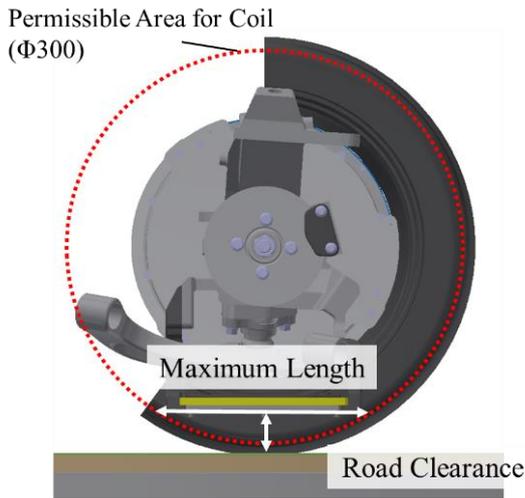


Fig.9 Permissible Area for Receiving Coil

受電コイルも同様にフェライトとリッツ線によって構成される。送電コイルとの違いはコンデンサをコイル外部に設けている点と、小型化のためにコイルを二層にしている点である。本研究で提案するシステムはコイルをばね下によって、エアギャップを最小化しつつ、変動を抑えているため、コイルへの縁石衝突回避のために Fig. 9 に示すタイヤの変形を考慮した赤円の範囲内に配置する必要がある。

タイヤの変形を考慮した場合のロードクリアランスとコイルの最大縦寸法の関係を図 10 に示す。ここではタイヤの変形は最大 20mm として計算している。

ロードクリアランスを縮めるためにはタイヤ径を大きくすることも影響するが、コイルの縦寸法を小さくすることが効果的であることが分かる。

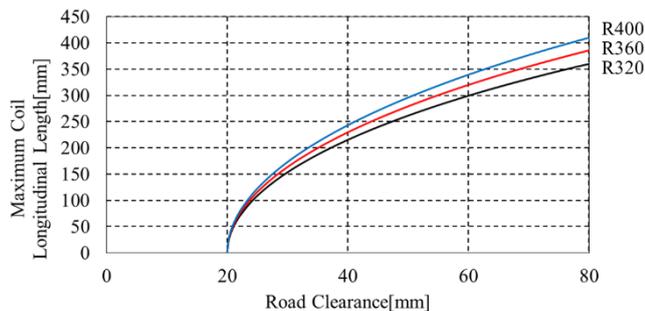


Fig.10 Coil Length Change by Road Clearance

4. 給電評価

4.1. コイルパラメータ

試作したコイルのパラメータを Table. 6 に示す。

Table.6 Coil Parameters

Items	Tx Coil	Rx Coil
Resistance	98.5mΩ	28.6mΩ
Self-Inductance	247.9μH	101.3μH
Mutual Inductance	23.5μH	

ここで提案する無線電力システムは送受電双方の送電コイルと共振コンデンサを直列に接続する Series-Series (SS) 方式である。SS 方式の理論最大効率 η_{max} は式(3)に示す結合係数、式(4)に示すコイルの Quality Factor (Q 値) より、式(5)で表される。

$$k = \frac{L_m}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (3)$$

$$Q_i = \frac{\omega_0 L_i}{R_i} \quad (i = 1 \text{ or } 2) \quad (4)$$

$$\eta_{max} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2})^2} \quad (5)$$

ここで k は結合係数、 Q_i はコイルの Q 値であり、 L_m は相互インダクタンス、 L_i はコイルのインダクタンス、 R はコイルの抵抗である。また 1 が送電側、2 が受電側を示す。式(5)よりコイル間の AC-to-AC 理論最大効率は 99.17% であった。

4.2. ベンチ評価

ベンチにて送電実験を行った。ベンチ試験の構成を図 11 に示し、テスト結果を図 12 に示す。

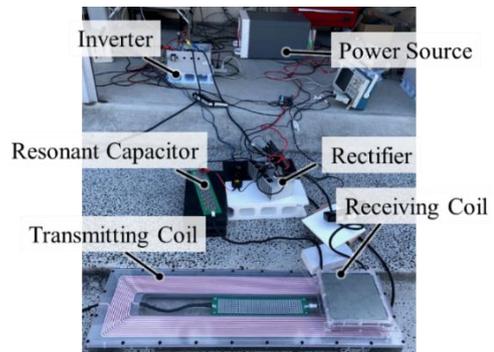


Fig.11 Bench Test

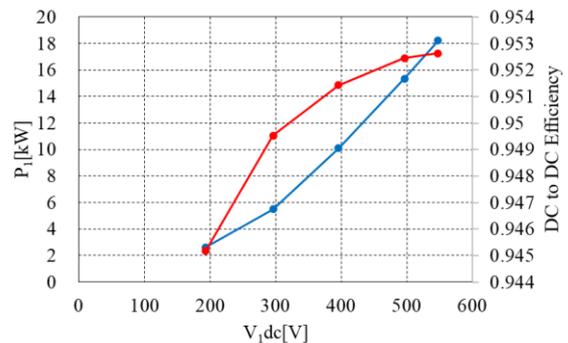


Fig.12 Maximum Output Test Result

受電側の DC 電圧は DC-to-DC 効率が最大化される電圧としている。547.7V の時に 18.2kW の出力かつ 95.2% の DC-to-DC 効率を達成した。受電側電圧制御により 20kW の出力も達成している。

4.3. 走行中給電

第 3 世代ワイヤレスインホイールモータの評価用車両を Fig. 13 に示す。ワイヤレスインホイールモータを後輪 2 輪に搭載している。

本車両を用いて、給電テスト結果を実施した。車速と DCDC コンバータの出力を Fig. 14 に示す。

車両として走行中に約 4kW の受電を確認した。DCDC コンバータの出力を計測しているため、惰行中のインバータの微小な出力も含まれている。ワイヤレスインホイールモータとしての走行と受電という基本的な機能の確認ができた。

5. まとめ

本研究では走行中に給電可能な第 3 世代ワイヤレスインホイールモータの開発を行った。ハードウェア製作と基本的な機能の動作確認及び給電評価を完了し、ベンチ上で 20kW の出力、92.5% の効率を実証した。

今後は各コンポーネントの詳細評価、システムの評価を進める。また制御技術開発を行い、さらなる高性能化やロバスト性を高める技術開発を行う。



Fig.13 Test Vehicle

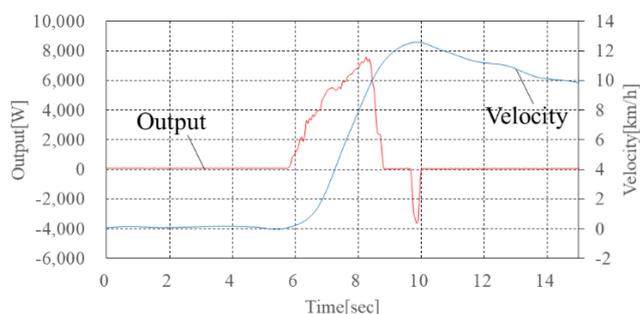


Fig.14 Dynamic WPT Test Result

6. 謝辞

本研究の一部は JST 未来社会創造事業 (Grant 番号 : JPMJMI17EM), JSPS 科研費 (基盤研究 A 課題番号 : JP18H03768) によって実施されたことを付記する。

参考文献

- (1) H. Fujimoto, T. Takeuchi, K. Hanajiri, K. Hata, T. Imura, M. Sato, D. Gunji, G. Guidi : Development of Second Generation Wireless In-Wheel Motor with Dynamic Wireless Power Transfer, The 31st International Electric Vehicle Symposium & Exhibition and International Electric Vehicle Technology Conference 2018, (2018)
- (2) T. Tajima, W. Noguchi, T. Aruga : Study of a Dynamic Charging System for Achievement of Unlimited Cruising Range in EV: SAE Technical Paper 2015-01-1686, (2015)
- (3) T. Ohira: Via-wheel power transfer to vehicles in motion: 2013 IEEE Wireless Power Transfer, (2013)
- (4) T. Fujita, T. Yasuda, H. Akagi : A Dynamic Wireless Power Transfer System Applicable to a Stationary System: IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 53, Issue 4, pp.3748-3757, (2017)
- (5) M. Sato, G. Yamamoto, D. Gunji, T. Imura, H. Fujimoto, : Development of Wireless In-Wheel Motor using Magnetic Resonance Coupling: IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31, Issue 7, pp. 5270-5278, (2016)
- (6) K. Hata, K. Hanajiri, T. Imura, H. Fujimoto, Y. Hori, M. Sato, D. Gunji, : Driving Test Evaluation of Sensorless Vehicle Detection Method for In-motion Wireless Power Transfer: 2018 International Power Electronics Conference, IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia-, Toki Messe, Niigata, Japan, pp.663-668, (2018)
- (7) K. Tokita, K. Hata, H. Fujimoto, Y. Hori, : Sensorless Vehicle Detection Using Voltage Pulses with Envelope Model for In-motion Wireless Power Transfer System, The 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon, Portugal, pp.4189-4194, (2019).
- (8) J. Sithinamsuwan, K. Hanajiri, K. Hata, T. Imura, H. Fujimoto, Yoichi Hori: Sensorless Automatic Stop Control of Electric Vehicle in Semi-dynamic Wireless Charging System, 2019 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power, London, UK, (2019)
- (9) 畑勝裕, 居村岳広, 堀洋一, : ハーフアクティブ整流器を用いたワイヤレス給電システムを受電側電力制御に基づく送電側効率制御: 電気学会論文誌 D, Vol. 138, No. 1 pp.22-29, (2018)
- (10) 矢崎雄馬, 藤本博志, 居村岳広: 85kHz 帯無線電力伝送システムのための要求仕様を考慮したコイル設計に関する検討: 電子情報通信学会無線電力伝送研究会, WPT2018-40, pp.63-68, (2018)