

ディファレンシャルギアを用いたハイブリッド車両用 動力分配システムに関する基礎研究

劉 峰^{*1} 加藤 英晃^{*2} 成田 正敬^{*2}

A Basic Study on a Power Distribution System Using Differential Gears for Hybrid Vehicles

by

Feng LIU^{*1}, Hideaki KATO^{*1}, and Takayoshi NARITA^{*1}

(Received on Mar. 31, 2025 and accepted on May. 29, 2025)

Abstract

Hybrid systems, which use multiple power sources including an internal combustion engine (ICE) and electric motors, are installed in many vehicles due to their high efficiency and practicality. Series-parallel hybrids currently on the market have a structure that combines an ICE, a drive motor, and a generator motor. However, due to the mechanism, it is sometimes not possible to convert all of the power generated into driving power, which poses issues in terms of output characteristics. Therefore, this study propose a hybrid system that uses a differential gear mechanism. This system can use all of the power generated by the three installed prime movers as driving force, which is expected to improve the dynamic characteristics of the vehicle. We developed hybrid system configuration that uses differential gears and investigated the output characteristics through simulations in three driving modes corresponding to driving conditions. As a result, it was confirmed that the proposed system can achieve higher output characteristics than conventional systems by integrating power sources.

Keywords: Power transmission system, Power distribution system, Hybrid system, Efficiency improvement, Output control

1. 緒言

近年、環境保護に関する規制が世界的にますます厳格化される、自動車業界では、環境性能の向上や省エネルギー性がこれまで以上に重要視されている。特に、二酸化炭素排出削減や化石燃料依存の低減が求められる状況下で、従来の内燃機関(ICE)と電気モータが発生する複数の動力を用いるハイブリッド車両は、その高い効率性と実用性により多くの車両に搭載されている。

ハイブリッド車両の開発において、車両システム全体のエネルギー利用効率の向上は重要な課題となっている。特に異なるドライブトレインを持つ動力伝達特性の差異がシステム全体の効率に顕著な影響を及ぼすことから、これらの特性を定量的に評価・比較することは、パワートレインの最適化設計を実現する上で理論的価値と工学的意義を有する。

現在、市販されている多くのハイブリッド車は、原動機として複数のモータと1基のICEを搭載している。通常、これらのモータのうち1基は発電専用として設計されており、車両の駆動力には直接使用されない。

現在販売されているハイブリッド車両のシステムは、Fig. 1 に示すように、大きく分けてシリーズハイブリッド、パラレルハイブリッド、シリーズ・パラレルハイブ

リッドの3種類に大別される。シリーズハイブリッドは同図(a)のように、ICE が直接車輪を動かすのではなくICE で発電した電力をバッテリーに充電し、その電力でモータを駆動して車を走行される、このシステムは EV のような静粛性を実現する利点を持つが、ICE の動力を駆動力に利用することができない点に課題がある¹⁾。一方パラレルハイブリッドは同図(b)のようにモータとICE が並列して配置される構造で、低回転域でトルクが小さいICE の欠点を補う利点がある²⁾。ただし、モータの出力が小さい場合やモータとICE を切り離す機構がない場合にはモータ単独での走行が困難となることがある。そこで、同図(c)のようにICE と駆動用モータ、発電用モータを組み合わせる構造を持つ、シリーズ・パラレルハイブリッドが広く採用されている³⁾。しかしながらシリーズ・パラレルハイブリッドは、構造上ICE の出力の一部を電力に変換して再度駆動に利用するため、エネルギー変換に起因損失が避けられない。また、EV モードからHEV モードに切り替わる際、ICE が始動してからクラッチを介して駆動系と接続されるまでの間、出力が駆動輪に伝わらない場合があり、出力の損失の点で課題がある。

そこで本研究はICE と2基のモータの出力を合成して出力できるような、差動歯車機構を用いたハイブリッドシステムを提案した。このシステムは搭載した3基の原動機で発生する出力を全て駆動力に利用することができ

*1 工学研究科機械工学専攻修士課程

*2 工学部機械システム工学科准教授

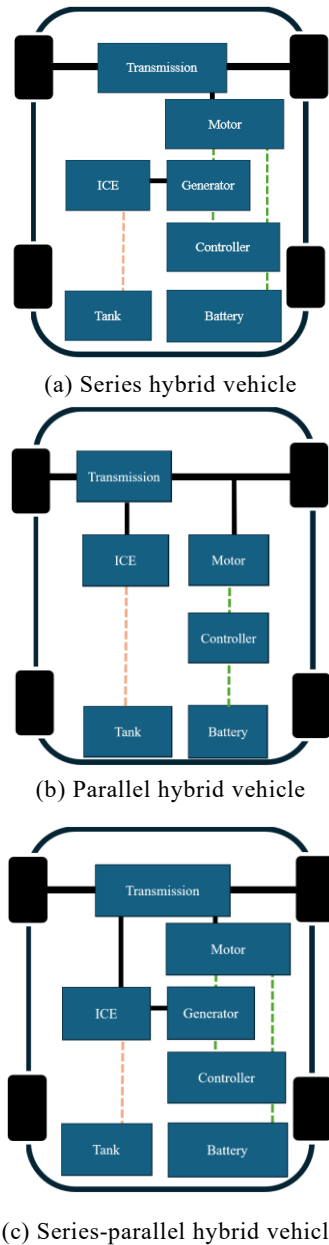


Fig. 1 Schematic of conventional hybrid system

るため、車両の動的特性の向上が期待できる。本論文は差動歯車を用いたハイブリッドシステムの構成を提案し、走行状況に対応する各走行モードにおける、出力特性についてシミュレーションにより検討した。

2. 従来のシリーズ・パラレルハイブリッドシステム

現在販売されているシリーズ・パラレルハイブリッドには、BYD 社製の DualMode-intelligent(DM-i)やトヨタ自動車株式会社製の Toyota Hybrid System(THS)など複数の方式が提案されている。DM-i は、Fig. 2(a)に示すように ICE、発電機、駆動用モータをクラッチで連結する構造を持ち、長距離 EV 走行が実現する利点があるが、バッテリー残量が少なくなると時高負荷出力を維持できない点に課題がある⁴⁾。

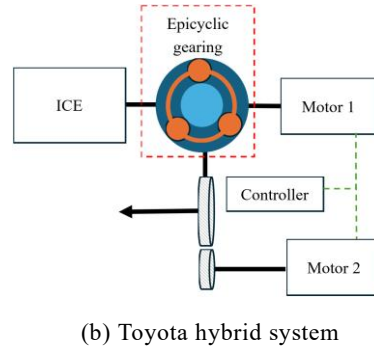
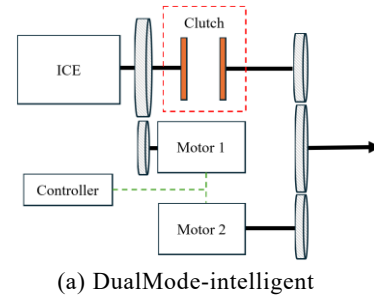


Fig. 2 Schematic of conventional series-parallel hybrid system



Fig. 3 Photograph of differential gear unit

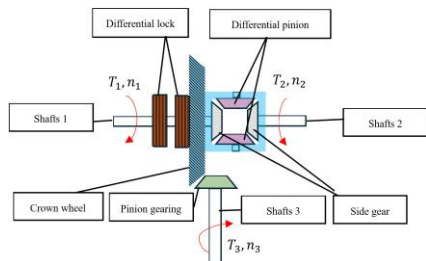


Fig. 4 Schematic of differential gear unit

また THS は、Fig. 2(b)に示すように ICE、発電機、駆動用モータを遊星歯車で連結し、動力を分配する構造を持ち、遊星歯車による動力分配で変速ショックがない利点があるが、ICE 出力の一部が発電機で利用され、駆動用モータで再び機械エネルギーに変換されるため ICE 負荷が増加する欠点に課題がある⁵⁾。

3. 提案するディファレンシャルギアを用いたシリーズ・パラレルハイブリッドシステム

3.1 使用するディファレンシャルギアの特性

提案するハイブリッドシステムに用いるディファレンシャルギアの写真を Fig. 3 に、概略図を Fig. 4 に示す。図中の Shaft 1 と 2 はそれぞれ Side gear と連結されてい

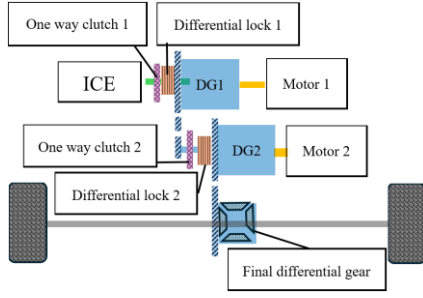


Fig. 5 Proposed System Configuration

る．Side gear に伝わるトルクは Differential Pinion を駆動し,Ring gear を介して, Pinion gear に伝わり, Shaft 3 から出力される． Shaft 1, 2, 3 それぞれのトルクを T_1 , T_2 , T_3 [N・m], 回転数を n_1 , n_2 , n_3 [rpm] とする．

ワンウェイクラッチより, Shaft 1 の回転が制限されている場合は, 図中左側の Side gear は固定されていると見なされる．この状態で出力軸が回転するとき, 出力トルクと回転速度は次式より求めた．

$$T_3 = 2 \cdot T_2 \quad (1)$$

$$n_3 = \frac{1}{2} \cdot n_2 \quad (2)$$

次に Shaft 1 と 2 の回転方向が一致している場合でも, 回転速度およびトルクには差が生じる．これらのトルクは Differential Pinion において合成され, 合成した力が Shaft 3 から出力される．このときの出力トルクと回転速度は次式より求めた．

$$T_3 = \frac{(T_1 \cdot n_1 + T_2 \cdot n_2)}{n_3} \quad (3)$$

$$n_3 = \frac{n_1 + n_2}{2} \quad (4)$$

3.2 ディファレンシャルギアを用いたハイブリッドシステム

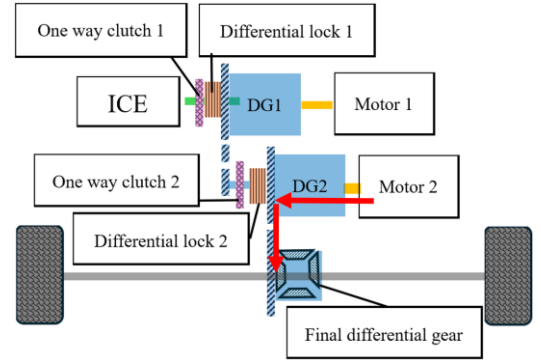
本研究で提案するシステムは Fig. 5 に示すように, ディファレンシャルギア機構を 2 基用いて動力分配を行う．ディファレンシャルギア (DG1) において, ICE と Motor 1 は連結され, 合成された動力はワンウェイクラッチを介して DG2 に入力される．DG2 は, 右側出力軸において Motor 2 に連結される．どちらのディファレンシャルギアにワンウェイクラッチ機構を配置した．これらの機構要素により, エンジンの逆回転防止や, 回転数の同期制御, エンジンの動力のみで走行するモード, スタートモータ機能を多重に実現する．

ハイブリッドシステムにおいては, 車両の構造や走行状況に応じて原動機を最適に制御する複数のモードが存在する．

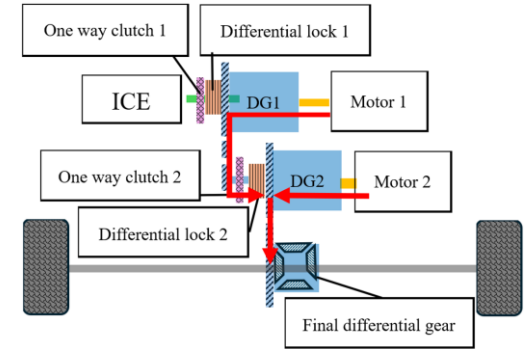
3.3 システムの駆動モード

3.3.1 EV モード

提案するシステムにおいて, モータのみで走行する, EV モードは 2 種類のモードが存在する．1 つ目 Fig. 6(a)



(a) Only motor 2 drives (EV1 mode)



(b) Motor 1 and 2 drives (EV2 mode)

Fig. 6 Schematic diagram of proposed system in EV mode

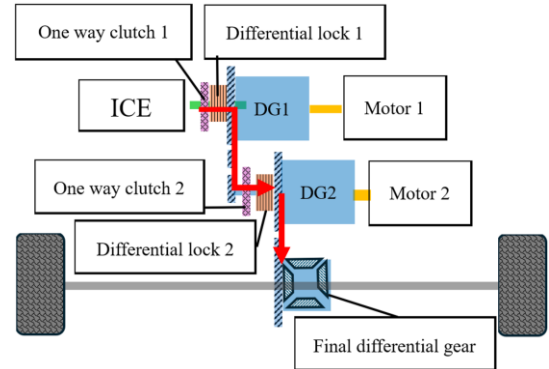


Fig. 7 Schematic diagram of proposed system in ICE Mode

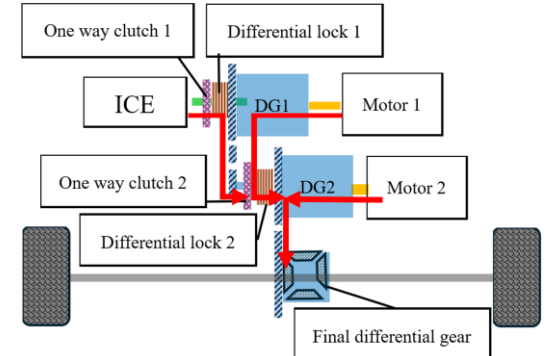


Fig. 8 Schematic diagram of proposed system in HEV Mode

に示すように, Motor 2 のみで車両を駆動する EV1 モードである．より大きな動力が必要な場合には Fig. 6(b)に示すように Motor 1 と Motor 2 を併用して駆動する．これにより, 高いトルクと回転数を得ることが可能である

Table 1 Hybrid System Operating Modes and Utilization

		ICE	Motor 1	Motor 2
Proposed System	EV	×	△	○
	HEV	○	○	○
	ICE	○	×	×
BYD DM-i	EV	×	×	○
	HEV	○	×	○
	ICE	○	×	×
TOYOTA THS II	EV	×	△	○
	HEV	○	×	○
	ICE			

Table 2 Specifications of Motors, and ICE

	Torque T	Power P	Rotational speed n
Motor 1	70 Nm	40 kW	18000 rpm
Motor 2	210 Nm	120 kW	18000 rpm
ICE	146 Nm	82 kW	6000 rpm

3.2.2 ICE モード

ICE モード時は Fig. 7 に示す. ように ICE が接続されている DG1 の Differential lock 1 を接続させ, DG1 の左右車軸回転数を同調させる. 2 つのモータの電気回路を切断することで, ICE の出力を車両駆動に利用する.

3.2.3 HEV モード

HEV モード時は Fig. 8 に示すように, ICE と Motor 1, 2 が同時に出力し, DG 1, 2 を介して動力が統合され, 車両を駆動する. これにより, 高いトルクと回転数を達成することが可能となる.

3.4 他のハイブリッドシステムとの比較

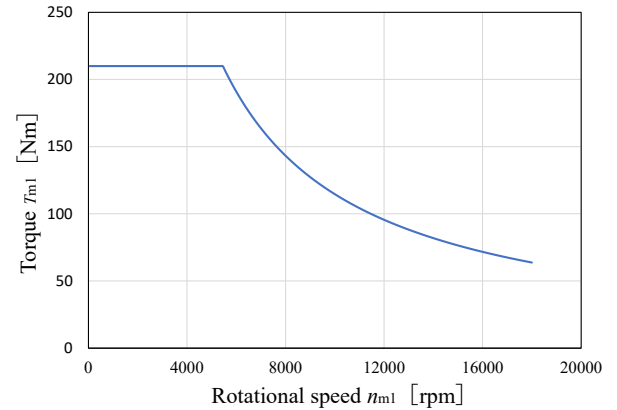
提案するシステムと従来のシステムの各モードに分ける各原動機の駆動力への寄与を Table 1 に示す. 表中の ○ は各原動機の動力を全て駆動力に利用でき, △ は一部が利用でき, × は利用できないことを示す.

トヨタの THS システムはスプリット方式を主としており, EV モードと HEV モードを実現可能であるが, エンジン作動時には 1 つのモータが変速機として回転数とトルクを調整する必要があるため, ICE モード (エンジン直接駆動) を実現できない. BYD DM-i とホンダの i-MMD などのパラレル方式を採用しており, EV, HEV, ICE モードで作動可能で, 1 つのモータは発電専用として機能する. 提案するシステムは, EV, HEV, ICE モードで作動可能であり, HEV モードでは全ての原動機の動力を車両の駆動力に利用できる.

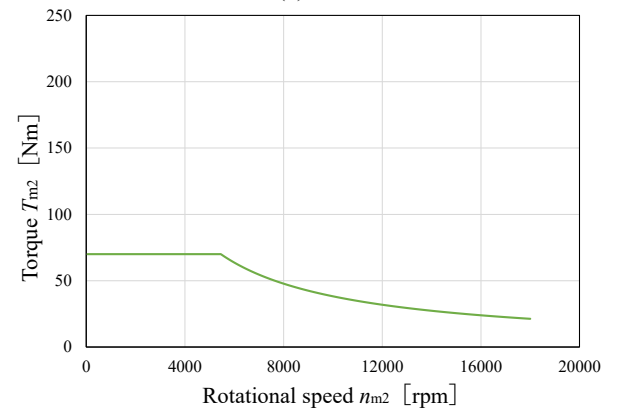
4. シミュレーションによる提案したシステムのトルク特性に関する検討

4.1 シミュレーション条件

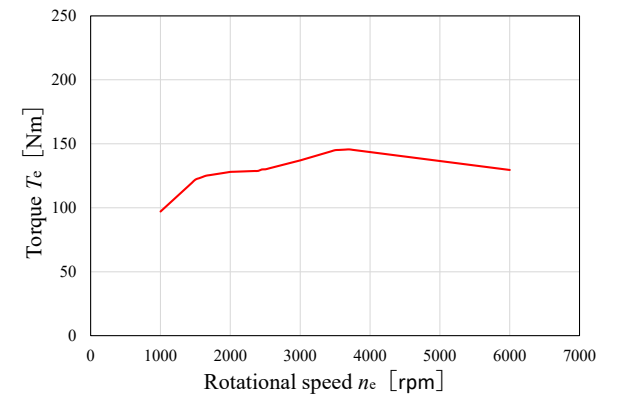
提案したシステムの動力特性についてシミュレーションにより検討を行った. 提案するシステムに ICE 1 基,



(a) Motor 1



(b) Motor 2



(c) ICE

Fig. 9 Relationship between torque and rotational speed in each power unit for proposed hybrid system

モータ 2 基を搭載し, ディファレンシャルギア 2 基で動力の統合を行う. 使用した Motor 1, Motor 2 及び ICE の最大トルク, 定格回転数, 出力を Table 2 に, 各原動機の回転数とトルクの関係を示す. 同図(a)は Motor1 におけるトルク T_{m1} [N・m] と回転数 n_{m1} [rpm], 同図(b)は Motor2 におけるトルク T_{m2} [N・m] と回転数 n_{m2} [rpm], 同図(c)は ICE におけるトルク T_e [N・m] と回転数 n_e [rpm] の関係を示す. これらの原動機の特性は BYD QIN L DM-i の駆動モータと発電機, ICE はマツダの Skyactiv 1.5G エンジン を参考に決定した. ICE と DG1 の減速比 i_1 を 2:1, Motor 1 と DG 1 の減速比 i_2 を 6:1, Motor 2 と DG2 の減速比 i_3 を 3:1, Final differential gear の減速比 i_4 は 2:1 とした

4.2 各システムの出力特性の算出

提案されたシステムと既存の BYD DM-i, THS において EV モード, HEV モードにおいてシステムの出力トルク $T_{sys,mode}$ [N・m] および回転数 $n_{sys,mode}$ [rpm] を計算した。なお, $T_{sys,mode}$, $n_{sys,mode}$ の sys は搭載したハイブリッドシステムの方式 (d :DM-i, t :THS, p :提案したシステム) を示し, $mode$ は走行モード (EV, HEV) を示す。

4.2.1 EV モード

BYD DM-i の EV モードにおける減速比 i_d は 12:1 であり, 次式のように算出した。

$$T_{d,EV} = \frac{T_{m2} * n_{m2}}{n_{d,EV}} \quad (9)$$

$$n_{d,EV} = \frac{n_{m2}}{i_{d,EV}} \quad (10)$$

TOYOTA THS では, システムの減速比 $i_{t,EV}$ は 12 : 1 とし, 各モードの出力軸におけるトルクと回転数は次式で表される。

$$T_{t,EV1} = \frac{T_{m2} * n_{m2}}{n_{t,EV1}} \quad (11)$$

$$n_{t,EV1} = \frac{n_{m2}}{i_{t,EV1}} \quad (12)$$

$$T_{t,EV2} = \frac{T_{m1} * n_{m1} + T_{m2} * n_{m2}}{n_{t,EV2}} \quad (13)$$

$$n_{t,EV2} = \frac{n_{m1}}{i_{t,EV2}} \quad (14)$$

提案システムの, EV1,2 モードのトルク及び回転速度を次式に示す。

$$T_{p,EV1} = \frac{T_{m2} * n_{m2}}{n_{p,EV1}} \quad (15)$$

$$n_{p,EV1} = \frac{n_{m2}}{i_3 * i_4} \quad (16)$$

$$T_{p,EV1} = \frac{T_{m1} * n_{m1} + T_{m2} * n_{m2}}{n_{p,EV1}} \quad (17)$$

$$n_{p,EV1} = \frac{\left(\frac{n_{m1}}{2 * i_2} + \frac{n_{m2}}{i_3}\right)}{2 * i_4} \quad (18)$$

4.2.2 HEV モード

BYD DM-i では, HEV モードにおける, 減速比 $i_{d,HEV1}$ は 4:1 であり, エンジンとモータ間の減速比 $i_{d,HEV2}$ は 3 : 1 であり, 次式のように算出される。

$$T_{d,HEV} = \frac{P_{ICE} + P_{m2}}{n_{d,HEV}} \quad (19)$$

$$n_{d,HEV} = \frac{n_{ICE}}{i_{d,HEV1} * i_{d,HEV2}} \quad (20)$$

TOYOTA THS では, HEV モード時におけるエンジンと Motor2 が同時に出力を発生させる。この際, エンジンの出力の一部が Motor1 による発電に用いられるとともに, エンジン出力トルクの制御が行われる。駆動系の減速比 $i_{t,HEV}$ は 4:1 であり, Motor2 と出力軸のトルク及び回転速度を次式で表される。

$$T_{t,HEV} = \frac{T_{m2} * n_{m2} + T_{ICE} * n_{ICE} - T_{m1} * n_{m1}}{n_{t,HEV}} \quad (21)$$

$$n_{t,HEV} = \frac{n_{m2}}{i_{t,HEV}} \quad (22)$$

提案するシステムでは, HEV モード時における ICE, Motor 1, Motor 2 と共に車両を駆動する場合の出力軸におけるトルク及び回転速度を次式に示す。

$$T_{p,HEV} = \frac{T_{ICE} * n_{ICE} + T_{m1} * n_{m1} + T_{m2} * n_{m2}}{n_{p,HEV}} \quad (23)$$

$$n_{p,HEV} = \frac{\left(\frac{n_{ICE}}{i_1} + \frac{n_{m1}}{i_2} + \frac{n_{m2}}{i_3}\right)}{2 * i_4} \quad (24)$$

4.3 シミュレーション結果

従来のシリーズ・パラレルハイブリッド車両では, ICE とモータをクラッチによって接続する方式が一般的である。この構成では, EV モードから HEV モードへの切り替え時に, ICE はまず始動し, 回転数がモータ側と一致した後にクラッチが接続される。したがって, エンジン始動からクラッチ接続までの間, ICE のトルクは駆動輪に伝達されず, その間に出力の損失が発生する可能性がある。本研究で提案するシステムは, ディファレンシャルギアを介して ICE とモータが常時接続されており, ICE 始動直後から両者の出力を合成して車両を駆動可能である。この構成により, 起動時のエネルギーロスを抑制できる。本稿ではこの利点を明確にするため, Fig. 10 にクラッチ方式との出力比較を示し, 時間軸に対する出力変化を定量的に評価した。▲は ICE 始動 (回転開始), ■は ICE の始動完了, ●はクラッチ接続を示す。この解析では基礎的な検討と仮定して ICE の角加速度を一定とし, 一般的な ICE の相場値の最高値に近い 0.01 秒間で 50rpm の増加率で一定に加速したのとして計算を行った。

EV モード解析において, BYD DM-i システムの EV モード, TOYOTA THS システムの EV モードと提案システムの出力特性をそれぞれ算出し, 出力軸の回転数とトルクの関係を図 11 に示す。EV モードにおける低速度域では, 提案システムは BYD DM-i と比較して高いトルクを用いて, TOYOTA THS と同等のトルク特性を示す。高速度域には, 提案システムが BYD DM-i および TOYOTA THS を上回るトルクを達成し, さらに広い回転数域を実現している。

HEV モード解析において, BYD DM-i システムの HEV モード, TOYOTA THS システムの HEV モードと提案システムの出力特性をそれぞれ算出し, 出力軸の回転数とトルクを図 12 に示す。HEV モードにおいて, 提案システムの総出力を BYD DM-i, TOYOTA THS と比較すると, すべての原動機が駆動力を提供できるため, 中高速度域でより高い最大トルクと最大回転速度を実現できる。

次に提案したシステムの EV1, EV2, HEV モードにおける出力軸のトルクと回転数の関係を図 13 に示す。提案システムの各モードにおける出力特性を算出した結果, EV モードでは Motor1 と Motor 2 が同時に駆動する際は Motor 2 のみで駆動することより高いトルクが出力でき, より大きな回転数の領域で運転することができると得

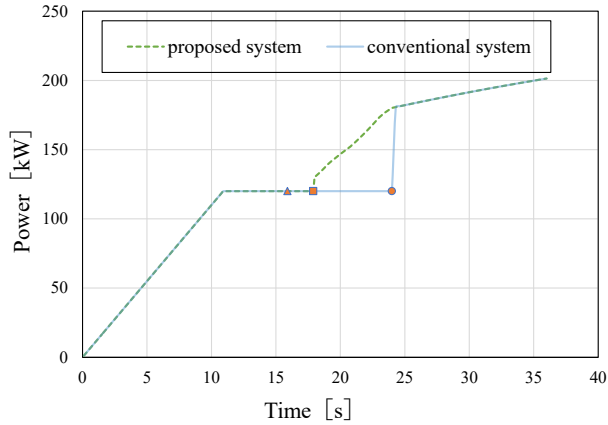


Fig. 10 Power Output and Event Timeline in Engine Start-up Process

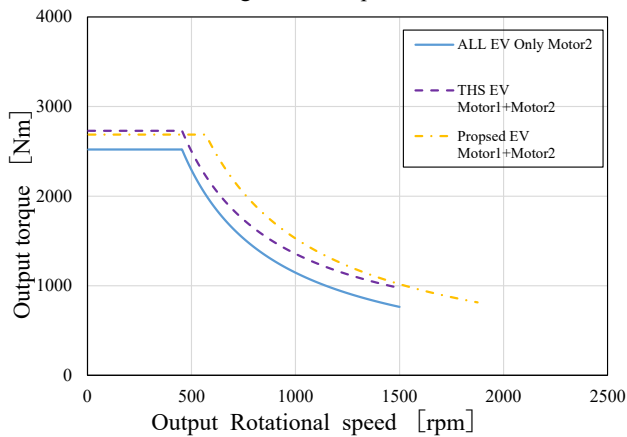


Fig. 11 Relationship between output torque and rotational speed in each system (EV mode)

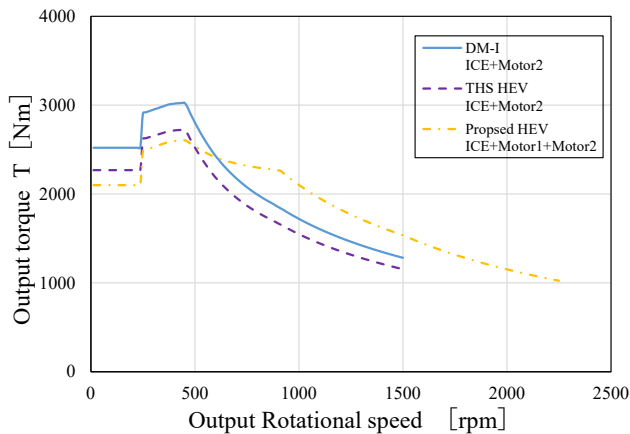


Fig. 12 Relationship between output torque and rotational speed in each system (HEV mode)

られた。HEV モードと EV モードを比較すると、HEV モードは低速域で、EV モードよりトルクが低い特性得られた。したがって、提案システムが低速度域で走行する際には EV モードを採用することで効率よく運転できると考えられる。中高速度域で走行する際には ICE を始動させることで、より大きなトルクと広い速度域を用いることができる。この特徴から、市街地走行などの低速度域が主体となる走行環境では EV モードを積極的に活用

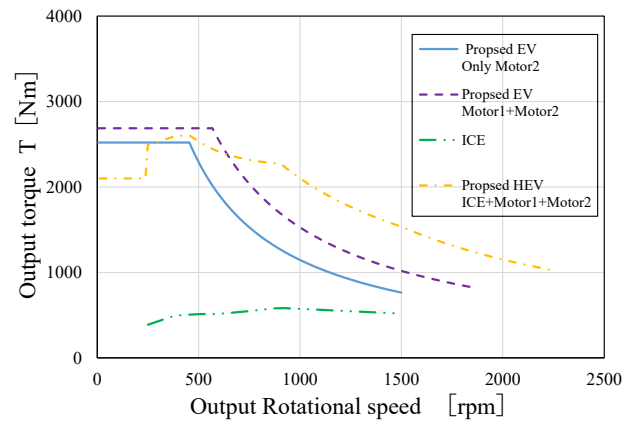


Fig. 13 Relationship between output torque and rotational speed in each system in each mode

し、高速域への移行に伴う動力要求の増大に応じて HEV モードで走行することが有利であると考えられる。

5. 結言

本論文では、ディファレンシャルギアを使用した動力分配機構を提案した。シミュレーションにより既存のシリーズ・パラレルハイブリッドシステムと出力特性について比較検討した結果、2 基のモータと ICE を同時に使用する状況下で高い出力特性が得られることを示した。特に、高回転数域での出力特性が優れていることが確認できた。今後は各モードをどの条件で切り換えた際に効率良く走行できるのかについて検討を行っていく。

参考文献

- 1) C. Nayanatara, P. Shanmugapriya, G. Gurusivakumar and B. Thiruvankadam, Design & development of series Hybrid Electric Vehicle, Energy, 2014 International Conference on Computation of Power, CD-ROM, pp. 114-117(2014). Chennai, India
- 2) Y. Zhang, H. Liu and Q. Guo: Varying-Domain Optimal Management Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicles, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 63, no. 2, pp. 603-616(2014).
- 3) L. Chen, F. Zhu, M. Zhang, Y. Huo, C. Yin and H. Peng: Design and Analysis of an Electrical Variable Transmission for a Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 60, no. 5, pp. 2354-2363(2011).
- 4) Munehiro Kamiya: Development of Traction Drive Motors for the Toyota Hybrid System, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 126, no. 4, pp. 473-479(2006).
- 5) G. Lu, D. Yang, Y. Rong, Z. Gong, Development of an Intelligent Thermal Management System for BYD DM-i Hybrid Engine, SAE Technical Paper, CD-ROM, pp.10(2021) Live Online Pennsylvania, United States