

遊星歯車変速機を用いた 2 モータ EV の空調機駆動システム

松尾典孝¹⁾

Air Conditioner Drive System for Dual-motor EV Using Planetary Gear Transmission

Noritaka Matsuo

In an EV equipped with an air conditioning system that directly cools the entire drivetrain with refrigerant, energy consumption of a conventional electric compressor system with integrated motor and compressor and a motor-compressor separated drive system in which the power of two traction motors is split into for traction and for compressor drive by a planetary gear transmission was compared by simulation, and the separated drive system proved to be better.

Key Words: EV and HV system, motor drive system, air conditioning, cooling, dual motor system, simulation (A3)

1. まえがき

近年地球温暖化が加速しており、世界各地で夏場は 40° を超える酷暑日が頻繁に観測されており自動車産業における温暖化対策の主役に位置づけられる EV においては走行以外に車室冷房やモータ・バッテリーの冷却に費やす電力エネルギーも併せて低減することが求められる。通常 EV はコンプレッサ駆動モータを走行用モータとは独立して制御する電動エアコンにより車速に関わらず一定の冷房能力を得ることができるが総消費電力の低減は各々のモータの効率向上に委ねるしかない。またコンプレッサを走行用モータからベルトまたはギアを介して駆動することは可能ではあるが車両停止時などモータが停止している間は冷房ができないなど冷房能力の変動が問題となる。

一方筆者が自技会 2023 年度春季学術講演会で報告したダブルピニオン遊星歯車変速機(以降 DPLG)を用いた 2 モータ EV¹⁾では図-1 に示すように走行用モータに連結するサンギア軸のいずれか、またはキャリア軸からベルトやギアを介してコンプレッサを駆動すれば目標の冷房能力を保ちつつ 2 基のモータの総消費電力を最少とするようモータ速度比を制御することで 1 モータ+電動エアコン方式に比べ総消費電力を低減できる可能性がある。本報告では同一走行条件、同一室内冷房能力の条件で 1 モータ EV と 2 モータ EV の消費電力をシミュレーションにより比較する。

2. EV の空調システム

図-2、図-3 に各々 1 モータ+電動エアコン方式および 2 モータ+DPLG サンギアによるコンプレッサ駆動方式の空調システムの冷媒回路を示す。図中 BAT はバッテリー、I はインバータ、M はモータ、C はコンプレッサ、EVAP は車室

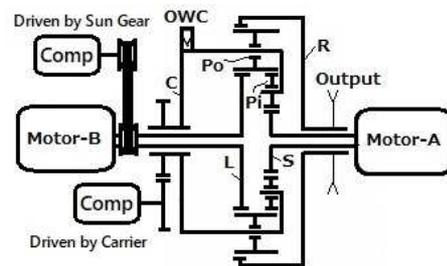


Fig.1 Air Conditioner Compressor Driving System of 2-Motor EV
冷房用エバポレータ、COND はコンデンサ、DPLG はダブルピニオン遊星歯車変速機を示し、また赤線は電力経路、黒線は動力伝達経路を示す。外気温がリチウムイオンバッテリーの適性温度の上限とされる 45° C に近くてもバッテリーの過熱を防止できるようバッテリーおよびモータインバータは冷却能力の高い冷媒直冷方式としている。

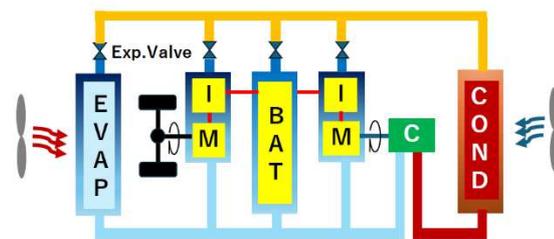


Fig.2 Normal Air Conditioner System of 1-Motor EV

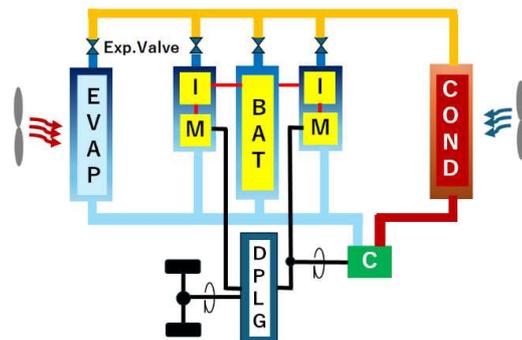


Fig.3 Air Conditioner System of 2-Motor EV with DPLG

1) 松尾技術士事務所 (436-0062 静岡県掛川市旭ヶ丘 1-15-12)
Email : mec-matsuo@mail.wbs.ne.jp)

2.1 2 モータ EV のコンプレッサ駆動方法

空調機は車速に関係なく目標とする一定の室内冷房能力を供給するものとし 1 モータ EV と共にコンプレッサは高効率運転が可能なよう可変容量型⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾を用いその回転方向は 1 方向に限られるものとする。今回 DPLG は図-1 に示すようにキャリア C の回転を OWC により片方向拘束するのでサンギア L とキャリア C はリングギア R の速度に関わらず常時正転させることが可能であるがサンギア S は R が停止または低速の時は逆転する。したがってコンプレッサはサンギア S またはキャリア C から駆動するものとする。

2.2 コンプレッサ駆動動力の計算法

室内冷房能力の目標値が Δ の時コンプレッサに供給すべき動力 W_a と電力 P_a を求める。バッテリーとモータ/インバータは冷媒直冷方式であり各部位を冷却する冷媒の吸熱量は各部位でのエネルギー損失による発生熱量に等しいとする。

1. 1 モータ+電動エアコン

図 2 の 1 モータ+電動エアコンにおける空調機の成績係数 COP は(1)式で表される。

$$COP = \frac{\Delta + \frac{W_t}{\eta_t}(1-\eta_t) + \frac{W_a}{\eta_a}(1-\eta_a) + \frac{R}{V^2} \left(\frac{W_t}{\eta_t} + \frac{W_a}{\eta_a} \right)^2}{W_a} \quad \text{-----}(1)$$

ここで Δ は目標の室内冷房能力、 W_t 、 η_t は走行用モータの動力と総合効率 (モータ効率 x インバータ効率)、 W_a 、 η_a はコンプレッサの駆動動力と総合効率、 R と V は各々バッテリー内部抵抗と電圧を意味し(1)式分子の第 2 項は走行用モータ部での吸熱量、第 3 項はコンプレッサ用モータ部での吸熱量、第 4 項はバッテリーでの吸熱量を示す。

(1)式で W_t は走行抵抗と減速機効率から求められるので、同式より W_a を求めることができる。こうして求めた W_t と W_a を用いて消費する全電力 P_{cons} は(2)式で求められる。

$$P_{cons} = W_t / \eta_t + W_a / \eta_a + R/V^2 (W_t / \eta_t + W_a / \eta_a)^2 \quad \text{-----}(2)$$

図-4 に $\Delta=15\text{kW}$ 、 $COP=3.0$ 、 $\eta_t=0.92$ 、 $\eta_a=0.88$ 、 $R=0.2\Omega$ 、 $V=400\text{V}$ の時の W_t に対するコンプレッサ消費電力 P_a を示す。空調機がモータやバッテリーを冷却しない場合は $W_a = \Delta / COP = 5\text{kW}$ 、電力 $P_a = W_a / \eta_a = 5.68\text{kW}$ 一定であるのに対し冷却する場合は P_a は W_t とともに増加する。

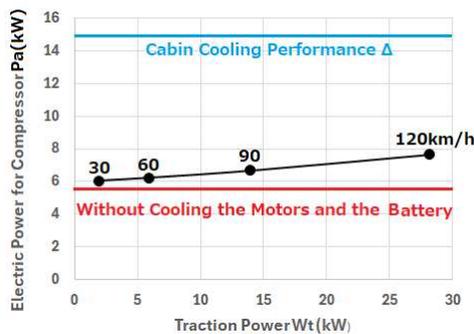


Fig.-4 Electric Power Consumption for Compressor Drive

2. 2 モータ+サンギア軸 L 駆動

一方 2 モータ EV でコンプレッサをサンギア軸 L から駆動するとすると COP は(3)式で表される。

$$COP = \frac{\Delta + \frac{W_{tS}}{\eta_{tS}}(1-\eta_{tS}) + \frac{W_{tL}+W_a}{\eta_{tL}}(1-\eta_{tL}) + \frac{R}{V^2} \left(\frac{W_{tS}}{\eta_{tS}} + \frac{W_{tL}+W_a}{\eta_{tL}} \right)^2}{W_a} \quad \text{---}(3)$$

(3)式で添え字 t_S はサンギア S に繋がる Motor-A、 t_L はサンギア L に繋がる Motor-B を意味している。

(3)式より(1)式同様 W_a を求めることができる。また全消費電力は(4)式で求めることができる。

$$P_{cons} = \frac{W_{tS}}{\eta_{tS}} + \frac{W_{tL}+W_a}{\eta_{tL}} + \frac{R}{V^2} \left(\frac{W_{tS}}{\eta_{tS}} + \frac{W_{tL}+W_a}{\eta_{tL}} \right)^2 \quad \text{-----}(4)$$

さらに走行抵抗から求まるリングギアの要求出力を W_R 、DPLG の効率を η_{DPLG} とすると

$$W_{tS} + W_{tL} = W_R / \eta_{DPLG} \quad \text{-----}(5)$$

W_{tS} と W_{tL} は(5)式を満たす範囲で P_{cons} を最少化することができる。これが DPLG を用いた 2 モータ EV の空調システムの特徴である。

図-5 にリングギア回転数とトルク (N_R, W_t) のブレイクポイントにおいて P_{cons} を(-)側まで含めて最少とするサンギア S とサンギア L の運転ポイントを探すためのフローチャートを示す。フローチャートにおいて探索範囲 RA, RB は基本的にはモータ T-N 座標上の 4 象限すべての領域であるが DPLG は OWC により片方向拘束する構造なので DPLG の Kinematics 計算によりキャリア速度 $N_c < 0$ またはトルク $T_c < 0$ となった場合は除外する。またモータの運転ポイントは許容範囲内であってもコンプレッサの速度、トルク、もしくは動力のいずれかが許容値を超えた場合も同様である。実際には更に(N_R, W_t)のブレイクポイントを繰り返し変えて最適制御マップを作成する。

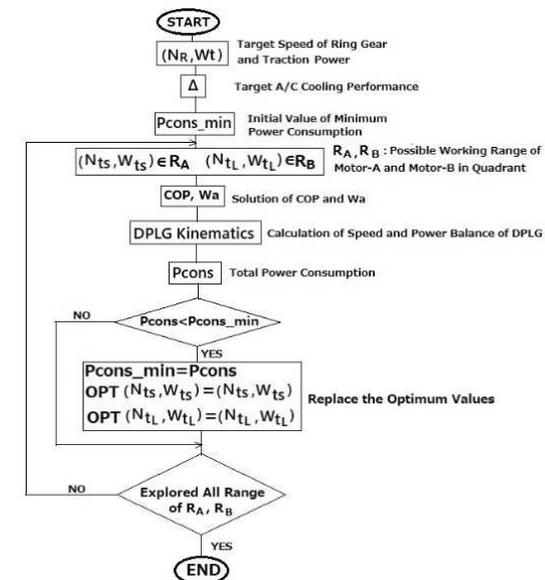


Fig.-5 Flow Chart to Search the Operating Point of Motors

3. 2 モータ+キャリア軸駆動

コンプレッサをキャリア軸から駆動する時、動力はサンギア軸 S と L の両方から供給されることになる。DPLG の S, L およびコンプレッサの速度を $\omega_s, \omega_L, \omega_a$ とすると

$$\omega_a = (\alpha \cdot \omega_L + \beta \cdot \omega_s) / (\alpha + \beta) \quad (6)$$

コンプレッサの駆動トルクを T_a とすると

$$T_a = W_a / \omega_a \quad (7)$$

DPLG の Kinematics より S と L の負担トルク T_{aS}, T_{aL} は

$$T_{aS} = \beta / (\alpha + \beta) T_a \quad (8)$$

$$T_{aL} = \alpha / (\alpha + \beta) T_a \quad (9)$$

$$W_{aS} = \omega_s \cdot T_{aS} \quad (10)$$

$$W_{aL} = \omega_L \cdot T_{aL} \quad (11)$$

COP は(12)式で表される。

$$COP = \frac{\Delta + \frac{W_{TS} + W_{AS}}{\eta_{TS}} (1 - \eta_{TS}) + \frac{W_{TL} + W_{AL}}{\eta_{TL}} (1 - \eta_{TL}) + \frac{R}{V^2} \left(\frac{W_{TS} + W_{AS}}{\eta_{TS}} + \frac{W_{TL} + W_{AL}}{\eta_{TL}} \right)^2}{W_a} \quad (12)$$

総消費電力 P_{cons} やその最小化のプロセスはサンギア軸 L 駆動の場合と同様である。

3. 消費電力のシミュレーション

3.1 車両諸元

1 モータ EV と 2 モータ EV を同一条件で比較するため車両基本諸元はできる限り共通とした。なお表-1 から表-3 のデータ欄で**を付した諸元は中国 BYD 社の EV のカタログデータ⁽⁵⁾を参考にしたもの、***は更に 1 モータ、2 モータ EV 共通のもの、*は両 EV に共通することを意味する。

1. 車両基本諸元

Table-1 Basic Specifications of Vehicle

Item	Specs.
Vehicle Weight(kg)	***1,750
Projected Front Area(m ²)	*3.2
Drag Coefficient	*0.29
Coefficient of Rolling	*0.01
Effective Tire Radius(m)	***0.346

2. 動力・駆動系諸元

○1 モータ EV

Table-2 Power System Specifications of 1-Motor EV

Component	Parameter	Specs.
Traction Motor (IPMSM)	Max. Torque(Nm)	**310
	Max. Power(kW)	**155
	Max. Speed(rpm)	**13,500
	Max. Voltage(V)/Current(A)	390/480
Battery	Nominal Voltage(V)	***390
	Internal Resistance(Ω)	*0.12
Inverter	Efficiency	*0.95
Decelerator	Gear Ratio	**2.852
	Transmission Efficiency	0.96
Final Gear	Gear Ratio	**3.746

モータ効率マップを図-6 に示す。目標最高速 160km/h を達成するため最高回転数が高く、高速での効率が低い。

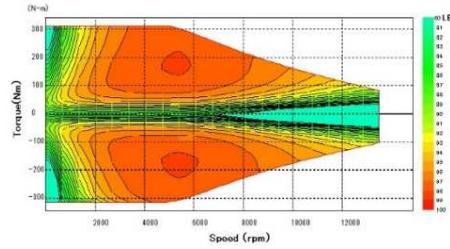


Fig.-6 Efficiency Map of the Traction Motor

○2 モータ EV

2 基のモータのトルクが等しい時に DPLG 内部のトルクバランスが取れるよう $\alpha - \beta = 2$ とし、DPLG の各ギア間の動力伝達効率は 0.98 とする。⁽⁴⁾ 次にモータ性能と減速比を決めるが走行性能が同じ条件で電費を比較するため最大駆動力と最高速を 1 モータ EV と同等とする。この時 1 モータ EV に対しモータ最高回転数比と減速比比率を k とし最大トルク比を $1/2k$ にすると当該条件を満たすことができる。今回は $k=0.59$ 、最高回転数 8,000rpm、最大トルク 260Nm とする。この時最大電流は 290A であり 1 モータ EV の 60% 程度である。

Table-3 Power System Specifications of 2-Motor EV

Component	Parameter	Specs.	
		α	β
DPLG	Gear Ratio		3.5
	Gear to Gear Eff.	$\eta_{1,2,3}$	0.98
Traction Motor(x2) (IPMSM)	Max. Torque(Nm)	260	
	Max. Power(kW)	80	
	Max. Speed(rpm)	8,000	
	Max. Voltage(V)/Current(A)	390/290	
Final Gear	Gear Ratio	6.521	

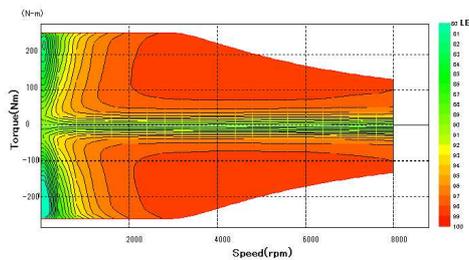


Fig.-7 Efficiency Map of the Dual Traction Motor

図-7 にモータ効率マップを示す。1 モータに比べ高速側の効率低下が少ないことがわかる。

図-8 に 1 モータ EV と 2 モータ EV の走行性能線図を示す。最大駆動力 9500N、最高速度 160km/h はほぼ同じである。

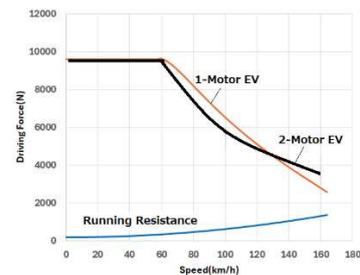


Fig.-8 Driving Force Diagram of 1-Motor EV and 2-Motor EV

3. 空調機

Table-4 Specifications of Cooling System

Item	Parameter	Specs.
Cooling Performance	Rated / Max(kW)	8 / 16
	Rate of Cooling(%)	80
Compressor	Speed Range (rpm)	1,000-7,500
	Max. Torque(Nm)	32
	Max. Power (kW)	8
	Gear Ratio	1:1
	*Total Motor Eff. (η_a)	0.88

**Applied to 1-Motor EV only, assumed by referring to a technical report on compressor motor.⁽⁶⁾

空調機およびコンプレッサの諸元を表-4 に示す。モータ・バッテリーの各部位で発生する熱の 80%を冷媒が吸収し、残りの 20%は管体内を伝導し大気に放出されるものとする。可変容量型コンプレッサの成績係数 COP 特性を図-9 に示す。COP は 3,000rpm の容積比 40%点で最大値 3.0 となる。

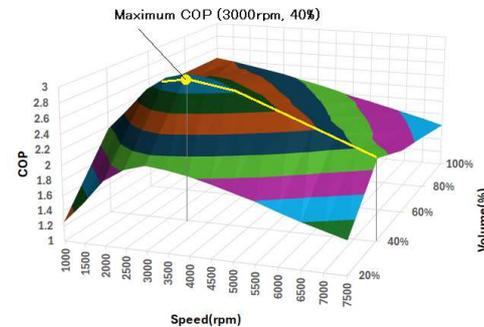


Fig.-9 COP Characteristics of the Variable Volume Compressor

3.2 2モータ EV のモータ制御

図-10、11 にコンプレッサをサンギア軸 L で駆動した場合とキャリア軸 C で駆動した場合のリング軸の T-N 平面での総消費電力 P_{cons} のマップを示す。正值は電力の消費、負値は電力の回生を意味する。両者の比較で顕著なのはキャリア軸駆動では低速でリングギアの最大トルクが大きく低下することでありこれは目標冷房能力 $\Delta=8kW$ を得るためのモータ B の動力が最大値 80kW に達したためである。

図-12 と図-13 に全域の最適速度差分布を示す。空調なしでは広い領域に亘りモータ速度が等しく DPLG の伝達効率が 1.0 となる DD 運転が最適であるが、空調ありでは速度差を与えた方がよいことがわかる。これは DPLG の伝達効率、モータ効率、コンプレッサ COP などいくつかのトレードオフ要因によって決まる全消費電力を最小化するようなモータ速度差を求めた結果である。

図-14 に定地走行での 2 基のモータの最適運転ポイントを DPLG の共線図を用いて比較した。

一方車両停止時は走行中のようなモータのマップ制御は行わず、リングギアの回転を両側拘束した上でモータ A(S 軸)を空転させモータ B(L 軸)をコンプレッサ駆動による消費電力が最小となるよう制御する。(図-15)。

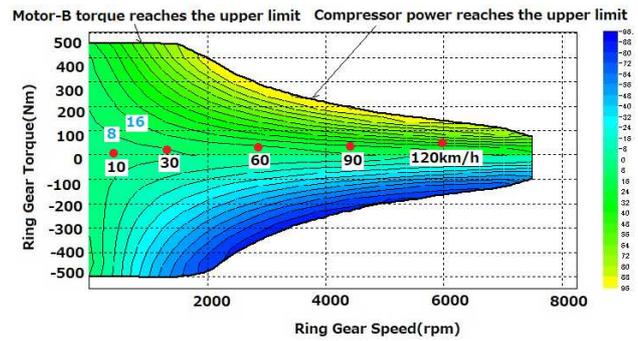


Fig.-10 Power Map with a Compressor Driven by Sun Gear L

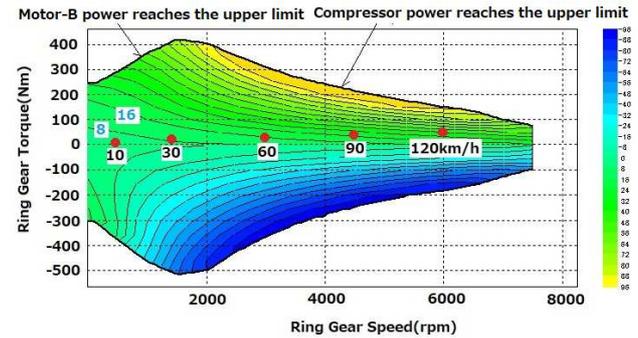


Fig.-11 Power Map with a Compressor Driven by Carrier

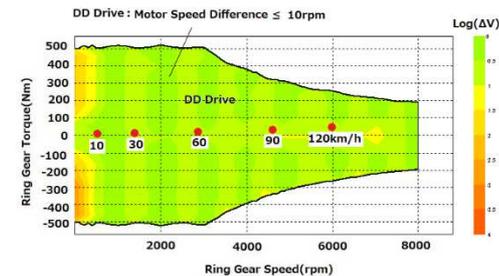


Fig.-12 Speed Difference Map with Air Conditioner off

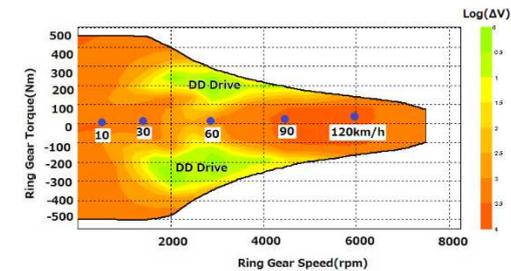


Fig.-13 Speed Difference Map with Air Conditioner on

3.3 定地走行電費のシミュレーション

1モータ EV+電動エアコン (以降 1M)、2モータ EV+サンギア駆動エアコンのマップ制御(以降 2M-SM)、2モータ EV+キャリア駆動エアコンのマップ制御(以降 2M-CM)、および 2M-SM のマップ制御に代わり DD 運転を行った時 (以降 2M-SD) の定速走行および車両停止時の消費電力のシミュレーション結果を図-16 に示す。車室冷房能力 Δ はいずれも 8kW とする。

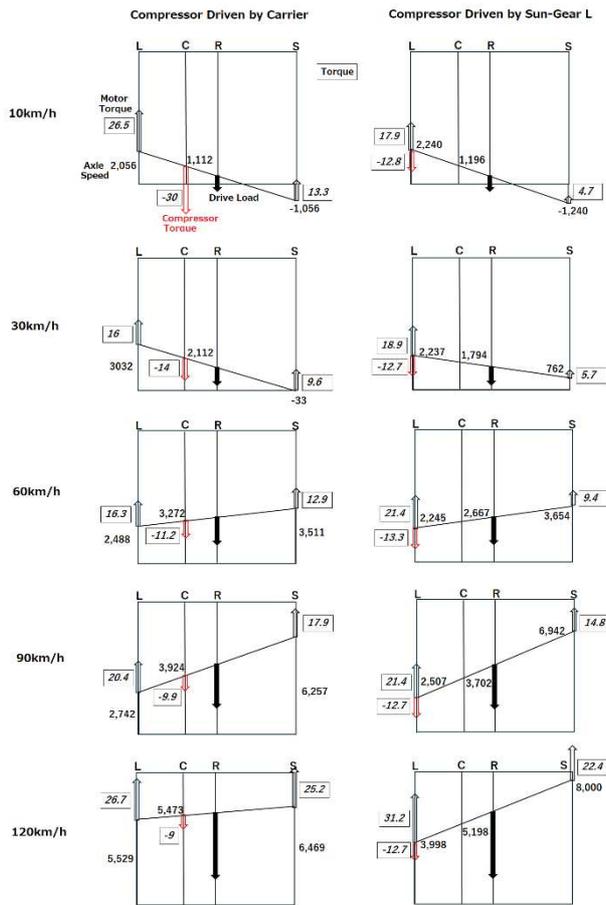


Fig. 14 Collinear Diagram of DPLG for Constant Speed Driving

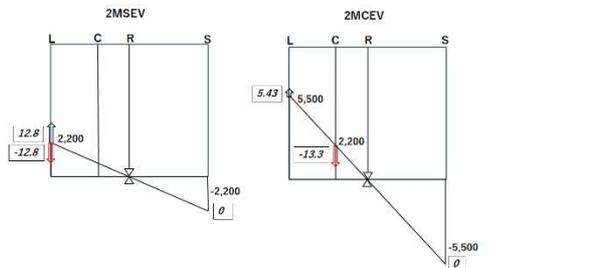


Fig. 15 Collinear Diagram of DPLG for Vehicle Stopping

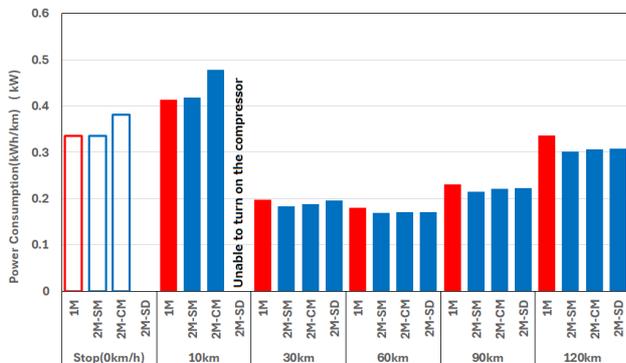


Fig. 16 Comparison of Power Consumption of the Four Systems

車両停止(0km/h)を除き塗潰棒線は単位走行距離当たりの消費電力量を意味する走行電費(kWh/km)を、車両停止時の白抜棒線は消費電力(kW)を、また赤は1モータEVを青は2モータEVの3仕様を示している。

まず2モータEV同士を比較する。10km/h および車両停止では2M-SDはコンプレッサ速度がその可動最低速度1,000rpmに達しないため空調は不可である。

また2M-CMは空調は作動するものの消費電力は2M-SMより14%程度多くなる。10km/hでは図-14に示すように2モータEVではモータBは力行運転、モータAは発電運転となる上2M-CMでは2M-SMに比べコンプレッサ速度が低いので目標 Δ を得るためコンプレッサ要求トルクが大きく、その結果モータA、Bのトルクの絶対値も大きくなり電力損失が大きくなる。また車速によらず2M-SMは2M-SDに比べ定地電費が優れており30km/hでその差は7.1%となる。これはDPLGにより2基のモータ速度を最適制御した結果と見ることができる。

次に1Mと2M-SMを比較すると車両停止時は同等、10km/hでは1Mが1%優れるが30km/h、60km/h、90km/hでは7%、120km/hでは10.6%、各々2M-SMが優れている。120km/hでの消費電力と冷房能力の内訳を表-5に示す。

Table-5 Breakdown of Power Consumption at 120km/h

Part	Item	1M	2M-SM
*Motor-A	Speed (rpm)	9,829	8,000
	Mechanical Output (kW)	28.14	18.72
	Total Efficiency	0.833	0.897
	Electrical Input (kW)	33.77	20.94
	Required Cooling Performance (kW)	4.51	1.72
*Motor-B	Speed (rpm)	*3,500	4,000
	Mechanical Output (kW)	*4.77	13.05
	Total Efficiency	0.88	0.917
	Electrical Input (kW)	*5.43	14.24
	Required Cooling Performance (kW)	0.522	0.945
Battery	Internal Loss by Current (kW)	1.17	0.901
	Required Cooling Performance (kW)	0.934	0.721
Drive-Train	Required Traction Power (kW)	27.01	27.01
	Transmission Efficiency	0.96	0.985
Required Cabin Cooling Performance (kW)		8	8
Total Electric Power Consumption (kW)		40.36	36.08
Total Cooling Performance (kW)		13.99	11.34
A/C Compressor	Speed (rpm)	*3,500	4,000
	Mechanical Drive Power (kW)	*4.77	4.44
	Electrical Input (kW)	*5.43	4.84
	COP	2.918	2.565

*In the 1M, motor A corresponds to the traction motor and B to the compressor motor respectively.

両者を比較すると走行に必要な駆動動力は同等であるが1Mの走行用モータの総合効率が低いので消費電力が多くまた空調機の要求冷房能力やコンプレッサ消費電力も多い。

3.4 WLTC モード電費のシミュレーション

車室冷房能力 Δ がモード走行中常に8kW一定という条件で1MEVと2MSEVのWLTCモード電費を比較した。

表-6にモード走行電費、モータの出力、電力損失、空調機コンプレッサ駆動動力、および冷房能力の時間平均値を示す。なおモータ平均出力欄の左は出力の相加平均であり発電運転では(-)値になるのに対し右の()内は出力の絶対値

の平均であり相加平均より電力損失との相関が強い。

Table-6 Simulation Results of Power Consumption in WLTC

Parts/Performance		1M	2M-SM
System	Power Consumption(kWh/km)	0.237	0.219
Motor-A	Ave. Output(kW)	3.89(7.99)	1.83(3.72)
	Ave. Loss(kW)	1.00	0.420
Motor-B	Ave. Output(kW)	3.22(3.22)	5.05(6.32)
	Ave. Loss(kW)	0.44	0.59
A/C	Ave. Driving Power(kW)	3.22	3.20
	Ave. Cooling Performance(kW)	9.26	8.91
	Ave. COP	2.88	2.79

(): Average of the absolute value of the outputs

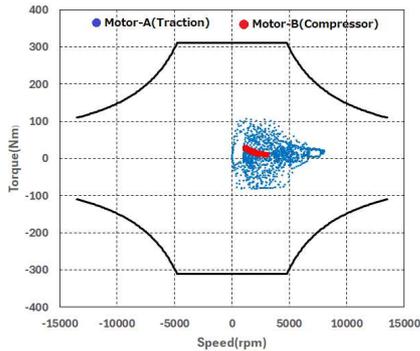


Fig.17 Scatter Plots of Motor Operating Point of 1M

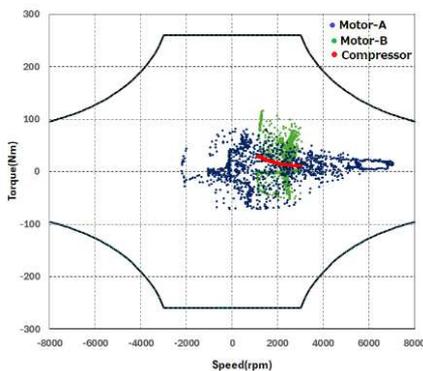


Fig.-18 Scatter Plots of Motor Operating Point of 2M-SM

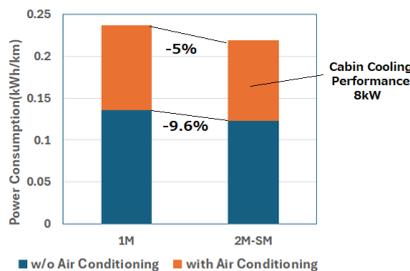


Fig.-19 Power Consumption w and w/o Air Conditioning

表より走行電費は2M-SMが7.6%優れていることがわかる。図-17、図-18に1Mと2M-SMの走行用モータとコンプレッサの運転ポイントの散布図を示す。1Mでは要求冷房能力に対し消費電力が最少となるよう電動コンプレッサの回転数を制御している。また2M-SMではモータBは効率が高くしかも空調機のCOPが高い回転数、トルク領域で運転されている。一方モータBが当該領域で運転できるよう

モータAの運転ポイントはT-N座標の4つの象限内に広く分布している。

次に空調の有無による走行電費を比較する。(図-19)空調無しでは2M-SMの電費は1Mに対し9.6%少なく、これは2M-SMのモータの高速域での効率が1Mに比べ高いためである。また空調有りでの1Mと2M-SMのモータBの出力と電力損失を比較すると2M-SMの方が出力の絶対値平均が96%多いにも関わらず損失は34%の増加に止まっている。(表-6)これは2M-SMのモータBがより効率の良い領域で運転されているからであり、その結果空調による電費の増加は1Mのそれより5%少なくなっている。

4. まとめ

1. 空調用コンプレッサモータを走行用モータとは独立して制御する電動エアコンを備えた1モータEVに対し、2基の走行用モータの動力をダブルピニオン遊星歯車変速機(DPLG)に投入し動力の一部をコンプレッサ駆動に用いる2モータEVとその空調システムを考案した。
2. 1モータEV、2モータEV共に空調システムは冷却能力が高く、車室冷房およびバッテリー・モータの冷却に空調機冷媒を用いる冷媒直冷方式とし、コンプレッサは高効率運転が可能な可変容量型とした。
3. 2モータEVの空調用コンプレッサをDPLGのサンギア軸もしくはキャリア軸から駆動するシステムを比較したところサンギア軸から駆動する方が消費電力を少なくできることがわかった。
4. 目標車室冷房能力を得た上で2基のモータの総消費電力を最少とするようモータ速度比を制御することで1モータEVに比べ消費電力を低減できることがわかった。その差は高速での定地走行で10.5%、WLTCモード走行で7.6%であった。

5. 参考文献

- (1) 松尾：ダブルピニオン遊星歯車変速機を用いた2モータEVシステムの検討，自動車技術会 2023 春季学術講演会予稿集 No.2791
- (2) 関田他：カーエアコン用スクロール圧縮機の省動力化技術，三菱重工技報 Vol.37 No.2(2000-3)
- (3) 渡辺他：容量制御システムによるカーエアコン省動力化，三菱重工技報 Vol.39 No.2(2002-3)
- (4) Jae Woong Choi et. al. "Performance Analysis on a Variable Capacity Swash Plate Compressor", 24th International Compressor Engineering Conference at Purdue 2018
- (5) <https://byd.co.jp/news/uploads/27c159a09b102cd924f1b5c7001ca8e32ae4c7b.pdf>
- (6) 佐藤他：エアコンのコンプレッサ用IPMモータの開発，愛知電機技報 No.30(2009)