

40-20135227 電気自動車への無段変速機の適用に関する基礎的検討*

郡司 大輔¹⁾ 今西 尚²⁾ 藤本 博志³⁾

Fundamental Applicability Study of Continuously Variable Transmission for Electric Vehicle

Daisuke Gunji Takashi Imanishi Hiroshi Fujimoto

In order to encourage broad use of electric vehicles (EVs), it is required that improving efficiency of the power train and extending cruising range of EVs. A possible solution is employing transmission which is properly optimized for EV. Especially continuously variable transmission (CVT) is suitable for EV because it maintains the operating condition of electric motor being closer to the most efficiency region. In this paper, we simulate efficiency characteristics of the transmission with the half toroidal CVT and the single ratio transmission. We compare total efficiency of each transmission and cruising range on some driving schedules by numerical simulation.

KEY WORDS: (Standardized) EV and HV systems, motor, (Free) Continuously variable transmission (A3)

1. はじめに

近年、電気自動車 (EV) への期待が高まっている。しかし、内燃機関車に比べて1回の充電で走行可能な距離が短いことが普及を阻害する要因となっており、パワートレインの軽量化・高効率化が求められている。

EVのパワートレインは永久磁石同期モータ (PMSM) と固定減速比減速機の組み合わせが主流であるが、高速走行時の弱め磁束制御による効率低下、可変速比 (定トルク領域の回転数と最高回転数の比) の不足が課題になっている。この解決のためには変速機の適用が有効であり、様々な変速機構を備えたEVの駆動ユニットが提案されている⁽¹⁾。無段変速機 (CVT) は変速がシームレスであり、変速制御や乗り心地の面からEVに適した変速機構であると言える。EVにCVTを適用する研究としては Hofman ら⁽²⁾ や泉ら⁽³⁾ の研究が知られているが、CVTの効率を一定値としたシミュレーション結果であり、CVTの変速比や入力トルクに応じた効率特性は反映されていない。

本報では無段変速機としてトロイダル CVT の効率特性をモデル化し、トロイダル CVT を搭載するEVと、固定減速比減速機のみを搭載するEVの総合効率特性と燃費計測サイクル走行での航続距離をシミュレーションにより比較した。その結果、CVTの適用による効率改善効果の傾向を明らかにした。

2. シミュレーションモデル

2.1. トランスミッションの構成

本報では2つのトランスミッションについて比較する。

(1) 固定減速比減速機 (Single ratio Transmission:SRT)

(2) ハーフトロイダル CVT + ファイナルギア

各トランスミッションの構成を Fig. 1 に示す。(1) はモータの出力を歯車減速機で減速して出力する構成である。(2) はモータの出力はハーフトロイダル CVT に入力され、任意の変速比で変速された後、歯車減速機で減速して出力する構成とした。

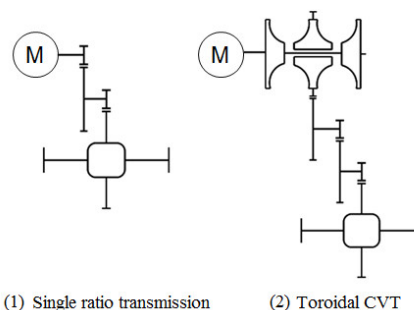


Fig. 1 Transmission structure

Table 1 Simulation parameters

	SRT	Toroidal CVT
Max power [kW]		75
Max torque [Nm]		2200
Max speed [km/h]		130
Vehicle weight [kg]	1495	1509
Variator ratio [-]	-	0.4 to 2.4
Final gear ratio [-]	8.0	8.0

2.2. 想定車両

Cセグメントクラスの仮想EVを想定し、駆動系の想定性能 Table 1 の通り定めた。同クラスの車両は車両重量が比較的軽く、都市間走行性能も求められるため高トルクと高速走行の両立が必要であり、変速機の必要性が高いと考えられる。

車両重量は同クラスの市販ICEVの重量を参考に、エンジンと変速機の推定重量を引いた分をベース重量とし、モータ、インバータ、バッテリーの推定重量を加算して求めた。走行抵抗の計算に必要なパラメータも同様に定めた。

2.3. 駆動系のモデル化

駆動系の構成要素のうちインバータ・モータ・トランスミッションについてモデル化し、それぞれの損失をシミュレーションする。定常状態での損失を検討するため、各要素の慣性モーメントは無視する。また、デファレンシャルギアの損失も無視する。所定のホイール軸トルク・角速度から駆動系の各要素を通過する動力と損失を求める。

*2013年5月22日自動車技術会春季学術講演会において発表。

1) 日本精工 (株) / 東京大学 (251-8501 神奈川県藤沢市鶴沼神明 1-5-50 / 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) 東京大学 (277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

2.4. トランスミッションの効率特性

効率特性を数式化するにあたり下記の近似をした。

- (1) 損失はトルク損失のみとし、速度は完全に伝達される
- (2) 順効率と逆効率は等しい。
- (3) 効率は入力トルク、変速比に対して依存性を持つ

トランスミッションの総合効率 η_T は次式で表せる。

$$\eta_T = k_n(n)k_T(T_r)\eta_v\eta_f \quad (1)$$

$k_n(n)$ は変速比依存係数, $k_T(T_r)$ は入力トルク依存係数, η_v は変速機構の最高効率, η_f はファイナルギア最高効率である。

変速比 n に対する依存係数は High 側 ($n \leq 1$) と Low 側 ($n > 1$) でそれぞれ別の 2 次式で近似する。各項の係数は変速比最 High (または最 Low) での係数, 変速比 1 での係数, 変速比 1 で 2 次式の微分値が 0 という 3 つの条件により定める。

$$k_n(n) = \begin{cases} A_{H2}n^2 + A_{H1}n + A_{H0} & (n \leq 1) \\ A_{L2}n^2 + A_{L1}n + A_{L0} & (n > 1) \end{cases} \quad (2)$$

次に入力トルク依存係数 k_T について述べる。一般にトランスミッションの機械損失として一定の摩擦トルクがあるため、入力トルクが低いほど効率が低下する。そこで入力トルク依存係数 $k_T(T_r)$ を式 (4) で表す。

$$T_r = \frac{T_{in}}{T_{max}} \quad (3)$$

$$k_T(T_r) = 1 - e^{-B_1 T_r} \quad (4)$$

ここで T_{max} はトランスミッションの最大入力トルクであり, T_r は正規化した入力トルクを表す。 B_1 は定数である。

モデル化した効率特性を Fig. 2 に示す。ここでトロイダル CVT の効率値は同程度のトルク容量のトロイダル CVT の実測値より変速比最 High において最高効率 98.0%, 変速比 1 で 94.7%, 変速比最 Low で 96.0%とした⁽⁴⁾。また、ファイナルギアの最高効率は歯車 2 噛み合いで 99.0%とした。

2.5. モーター

モータは埋込型永久磁石同期モータ (IPMSM) とし, 等価鉄損抵抗による鉄損考慮モデル⁽⁵⁾を用いる。モータ電流制御は最大効率制御⁽⁵⁾を用いる。所定のトルク T_m が与えられると i_{oq} を i_{od} により表すことができ, さらに損失を最小化する i_{od} が下記の通り求められる。

$$T_m = P_n(\Psi_a i_{oq} + (L_d - L_q)i_{od}i_{oq}) \quad (5)$$

$$T_m^2 = \frac{AB}{C} \quad (6)$$

$$A = P_n\{R_a R_c^2 i_{od} + \omega^2 L_d (R_a + R_c)(\Psi_a + L_d i_{od})\}$$

$$B = \{\Psi_a + (L_d - L_q)i_{od}\}^3$$

$$C = \{R_a R_c^2 + (\omega L_q)^2 (R_a + R_c)\}(L_d - L_q)$$

ここで $R_a[\Omega]$ は相巻線抵抗, $R_c[\Omega]$ は等価鉄損抵抗, $P_n[-]$ は極対数, $\Psi_a[\text{Wb}]$ は電機子鎖交磁束, $L_d, L_q[\text{H}]$ はそれぞれ d 軸, q 軸インダクタンスである。これを解析的に解くことは難しいため, ニュートン・ラフソン法を用いて数値的に解く。得られた解において制限電圧を超えた場合, 弱め磁束制御により定トルク曲線と電圧制限楕円の交点となる i_d, i_q を求める。

モータの損失は銅損 W_c と鉄損 W_f を考慮した。それぞれ下式で求められる。

$$W_c = R_a(i_d^2 + i_q^2) \quad (7)$$

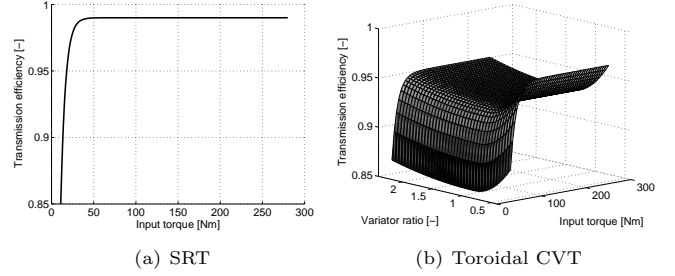


Fig. 2 Transmission efficiency chart

Table 2 Motor parameters

	SRT	Toroidal CVT
Max torque [Nm]	280	200
Max speed [rpm]	10000	5000
Variable speed ratio [-]	4.0	1.5
Max power [kW]	77	79
d-axis inductance L_d [mH]	0.462	0.429
q-axis inductance L_q [mH]	0.806	0.788
Magnetic flux Ψ_a [Wb]	0.188	0.178
Winding resistance R_a [Ω]	0.0237	0.0264
Equal iron loss resistance R_c [Ω]	280	280
Estimated weight [kg]	62	54

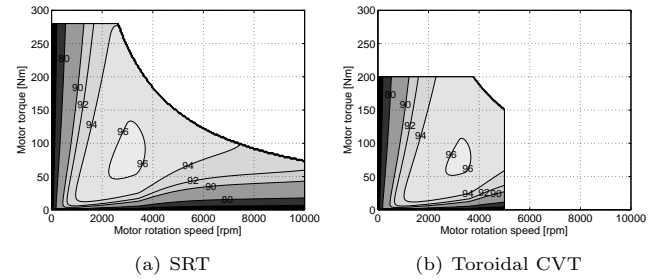


Fig. 3 Motor-Inverter efficiency chart

$$W_f = \frac{v_{od}^2 + v_{oq}^2}{R_c} \quad (8)$$

なお, 本モデルで鉄損を求めた場合, 電圧制限下において磁場解析の結果と大きな差異が生じたため, 回転数に応じて等価鉄損抵抗を補正した。

SRT 用と, CVT 用の 2 つのモータを磁場解析ソフトウェアを用いて設計した。各モータの性能とパラメータを Table 2 に示す。CVT 用のモータの方が軽量であり, 可変速比の小さいモータの方が小型・軽量にできることを示唆している。

2.6. インバータ

インバータは電圧型 PWM インバータであり, 両駆動系で同じであるとする。損失は IGBT モジュールの損失のみ考慮し, IGBT 定常損失 W_{Qsat} , FWD 定常損失 W_{Dsat} , IGBT ターンオン損失 W_{Qon} , IGBT ターンオフ損失 W_{Qoff} , FWD リカバリ損失 W_{Drr} の総和として求められる。各損失は IGBT モジュールの特性を線形近似して下式により求めた⁽⁶⁾。

$$W_{Inv} = 6(W_{Qsat} + W_{Dsat} + W_{Qon} + W_{Qoff} + W_{Drr}) \quad (9)$$

$$W_{Qsat} = \frac{V_{Q0} I_e}{2} \left(\frac{1}{\pi} + \frac{m}{4} \cos \phi \right) + \frac{R_Q I_e^2}{2} \left(\frac{1}{4} + \frac{2m}{3\pi} \cos \phi \right) \quad (10)$$

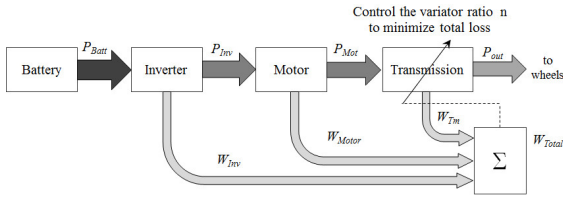


Fig. 4 Power flow diagram of the power train

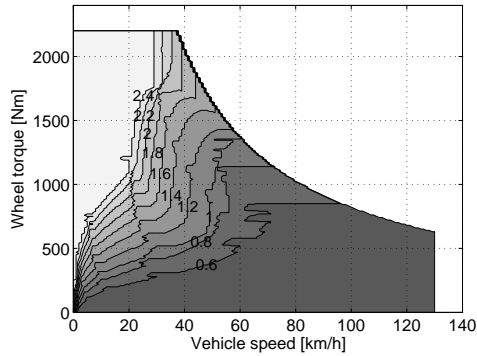


Fig. 5 Optimized variator ratio

$$W_{Dsat} = \frac{V_{D0} I_e}{2} \left(\frac{1}{\pi} - \frac{m}{4} \cos \phi \right) + \frac{R_D I_e^2}{2} \left(\frac{1}{4} - \frac{2m}{3\pi} \cos \phi \right) \quad (11)$$

$$W_{Qon} = \frac{k_{Eon} I_e f_s}{1000\pi} \quad (12)$$

$$W_{Qoff} = \frac{k_{Eoff} I_e f_s}{1000\pi} \quad (13)$$

$$W_{Drr} = \frac{k_{Err} I_e f_s}{1000\pi} \quad (14)$$

ここで V_{Q0} , R_Q , V_{D0} , R_D , k_{Eon} , k_{Eoff} , k_{Err} はそれぞれ IGBT モジュールの V_{CE-IC} 特性図, $V_F - I_F$ 特性図, スイッチング損失係数特性図から読み取った係数値であり, 具的な数値は市販産業用 IGBT モジュールのデータシート⁽⁷⁾より読み取った. また, I_e [A] は相電流振幅, $\cos \phi$ [-] はモータ力率, m [-] は変調率, f_s [Hz] はスイッチング周波数である.

Fig. 3(a)(b) に SRT 用, CVT 用それぞれのモータ・インバータのトータル効率を示す. 両モータが駆動可能な動作範囲における効率特性はほぼ同じである.

2.7. バッテリー

市販 EV のリチウムイオンバッテリーの諸元⁽⁸⁾を参考に容量は 24 kWh とした. 簡単のため SOC (State Of Charge) の変化による出力電圧変化はないとし, 充放電効率は 100% であるとした.

3. シミュレーション

3.1. トロイダル CVT での最適変速比

エネルギーフロー図を Fig. 4 に示す. 任意の出力 P_{out} の動作点においてインバータ損失 W_{Inv} , モータ損失 W_{Motor} , トランスミッション損失 W_{Tm} の総和 W_{Total} が最小となる変速比 n を求めた. シミュレーション結果を Fig. 5 に示す.

Fig. 5 より低トルク領域では最 High ($n = 0.4$), 大トルク領域では最 Low ($n = 2.4$) が選択されていることが分かる. Fig. 2(b) に示すようにトロイダル CVT は変速比の両端 (最 High,

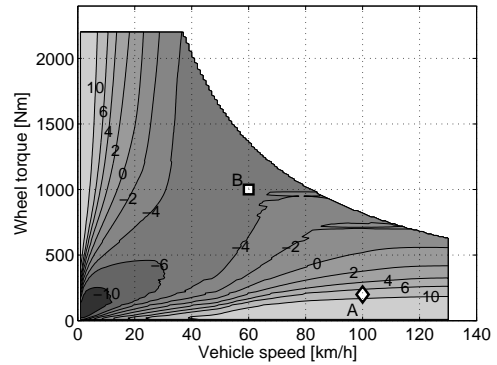
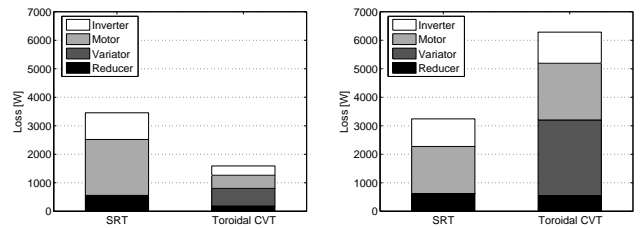


Fig. 6 Total efficiency comparison



(a) Condition A

(b) Condition B

Fig. 7 Loss analysis

最 Low) ほど効率が良いので, 変速機効率の良い動作点がより多く選択されていると言える.

3.2. 総合効率の比較

両トランスミッションの総合効率をそれぞれ求めて比較した. Fig. 6 にシミュレーション結果を示す. 図中等高線はそれぞれの総合効率 [%] の差であり, 正の値はトロイダル CVT の方が効率が良いことを, 負の値は SRT の方が効率が良いことを表している.

比較結果より, 低速・高トルク領域と高速・低トルク領域においてトロイダル CVT の方が高効率であることが分かる. 一方, 中間の領域では効率が低下してしまっている.

この原因を分析するため, Fig. 6 中に示した 2 点の動作点 A (100km/h, 200Nm) ・ B (60km/h, 1000Nm) について損失の内訳を調べた. 結果を Fig. 7 に示す. 動作点 A においてはトロイダル CVT の方が効率が良い. Fig. 7(a) より CVT で変速することでモータの動作点が移動し, モータ・インバータ損失が大幅に低減されており, これにより総合効率が改善していることが分かる. 一方, 動作点 B においては, 両者のモータ・インバータ損失はほとんど同じであり, 変速機の機械損失の分だけトロイダル CVT の方が損失が多くなってしまっている.

変速によりモータ動作点を移動することで得られるモータ・インバータの損失低減量を ΔW_{MIOP} , その動作点におけるトランスミッション損失を W_{TmOP} とすると, 変速により総合効率が改善する条件は

$$\Delta W_{MIOP} > W_{TmOP} \quad (15)$$

である. 中間領域においてはモータ・インバータ効率が非常に高いため ΔW_{MIOP} が小さく, W_{TmOP} の方が大きいため, 変速により効率が低下してしまう. したがって CVT により効率が低下する領域を小さくするためには, 条件式から明らかなようにト

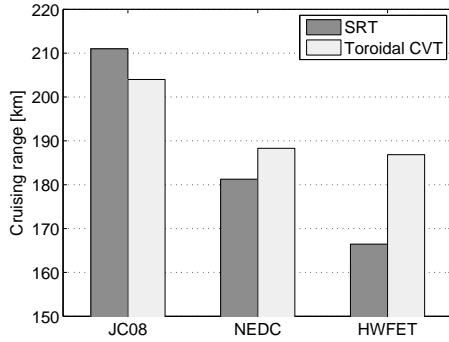


Fig. 8 Cruising range simulation result

Table 3 Cruising range simulation result

Driving cycle	Average speed [km/h]	Cruising range [km]	
		SRT	Toroidal CVT
JC08	34.8	211.0 (-)	204.0 (-7.0)
NEDC	44.4	181.3 (-)	188.3 (+7.0)
HWFET	77.7	166.4 (-)	186.9 (+20.5)

(value) : compare with SRT [km]

ランスミッション損失を減らす必要がある。

3.3. 燃費計測走行サイクルでの比較

JC08 モード, NEDC(New European Driving Cycle), HWFET(EPA Highway Fuel Economy Cycle) の3つの燃費計測走行サイクルにおいて航続距離をシミュレーションした。回生電力(インバータ出力)の50%をバッテリーに回収できると仮定した。シミュレーション結果を Fig. 8, Table 3 に示す。

JC08 では SRT の方が航続距離が長い。これは、走行の平均速度が遅く、SRT の方が効率優位な動作点の使用頻度が高いためである。一方、NEDC と HWFET ではトロイダル CVT の方が航続距離が長く、特に HWFET ではその差が顕著である。すなわち、走行の平均速度が速く、CVT の方が効率優位な動作点の使用頻度が高いほど大きな航続距離延長が得られている。

3.4. レシオカバレッジの影響

トロイダル CVT のレシオカバレッジの影響を検証するため、Table 4 に示す5通りのレシオカバレッジで航続距離を比較した。なお、最高効率・効率特性・ファイナルギア比はレシオカバレッジによらず同じであるとした。傾向を明らかにするため、トロイダル CVT としての実現性は無視している。シミュレーション結果を Fig. 9 に示す。

JC08 モードの航続距離を見ると、レシオカバレッジによる変化はごくわずかである。このことから、SRT が優位な動作点において、レシオカバレッジの拡大が効率の改善に寄与しないことが分かる。

NEDC と HWFET では、レシオカバレッジの拡大に応じて航続距離の延長が得られる。しかし、その効果は限定的であり、実際のトロイダル CVT の現実性を考慮すると、トロイダル CVT を用いる場合レシオカバレッジ6程度で十分であると言える。

Table 4 Ratio coverage parameter

Ratio coverage	Highest	Lowest
4.0	0.5	2.0
5.0	0.45	2.25
6.0	0.4	2.4
8.0	0.35	2.8
10.0	0.31	3.1

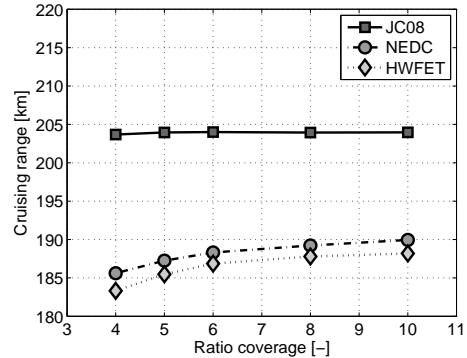


Fig. 9 Effect of the ratio coverage

4. まとめ

トランスミッションの効率特性をモデル化し、固定減速比減速機のみと、ハーフトロイダル CVT を備えるトランスミッションの総合効率をシミュレーションで比較した。その結果、低速・大トルク領域と高速・低トルク領域でトロイダル CVT の方が効率が優れるとともに、中間領域においては、CVT により効率が低下することを明らかにした。また、損失成分の分析によりその原因を明らかにした。平均速度の異なる燃費計測走行サイクルでの電費を比較し、平均速度が高いほど CVT による電費改善効果が高いことを示した。さらに、トロイダル CVT の適用において必要なレシオカバレッジを示した。

本報での検討ではポンプ損失、軸受損失といった要因が考慮されていない。今後はこれらの要因を含めた検討を行うとともに、中間領域での効率低下を防ぐようなトランスミッションの構成、慣性を考慮した動的な消費エネルギーでの比較、CVT の適用に適したモータ効率特性、効率面以外での CVT による制御上の優位性などについて検討する必要がある。

参考文献

- (1) 郡司大輔, 松田靖之, 田中一字, “変速機構を有する EV 駆動ユニットの開発”, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.58-12, pp.1-4, 2012
- (2) T. Hofman, C. H. Dai, “Energy Efficiency Analysis and Comparison of Transmission Technologies for an Electric Vehicle”, in *Proc. of IEEE VPPC 2010*, pp.1-6, 2010
- (3) 泉照之, 李作維, “CVT をもつ電気自動車を省エネルギー運転するための最適変速比関数”, 自動車技術会学術講演会前刷集, No87-11, pp.9-12, 2011
- (4) 大石保徳, 西井大樹, 井上英司, “ハーフトロイダル CVT の最新技術動向”, 自動車技術, Vol.65, No.9, pp.92-96, 2011
- (5) 武田洋次, 松井信行, 森本茂雄, 本田幸夫, “埋込磁石同期モータの設計と制御”, オーム社, 2001
- (6) 逸見次郎, 船渡寛人, 池田吉堯, “PWM インバータの短絡電流抑制と損失評価”, 電気学会論文誌 D, No.111, Vol.9, pp.741-750, 1991
- (7) 富士電機 IGBT モジュール 2MBI200VA-060-50 データシート
- (8) 小川和也, 轟木直人, 田口博基, 茂刈武志, 小久保毅之, “日産リーフに搭載した高容量型リチウムイオンバッテリーの開発”, NISSAN TECHNICAL REVIEW, No.69, 70, pp.41-45, 2012