UDC 621.316.718.5.078.4: 629.113.65

論文

54-B85

電気自動車の自動変速制御方式とその特性

正員 大 前 力 (日 立)
 正員 丸 本 勝 二 (日 立)
 非会員 山 村 博 久 (日 立)
 非会員 三 谷 稔 (東洋工業)
 非会員 益 永 茂 治 (東洋工業)

1. ま え が き

都市内におけるガソリンエンジン自動車の排気ガス汚染、騒音などの公害は、大きな社会問題となっており、この点から電気自動車の開発が急速に進められている⁽¹⁾⁽²⁾。

ところで、電気自動車騒動システムの一つとして、通常のガソリンエンジン自動車と同様にギヤ変速機構を備えたシステムがある。この騒動システムでは、騒動用電動機が小形で良いという利点がある反面、操作性があまりよくないという欠点がある。そこで、この点に対処するために、ギヤ切換を自動的に行なう自動変速制御方式の開発が重要となっている。

ところで、ガソリンエンジン自動車では、動圧利用の流体式自動変速機を用いて自動変速制御を行なうのが一般に実用化されている⁽³⁾。この方式は、トルク伝達効率が悪く一充電走距離が問題となっている電気自動車には適さない。一方、電気自動車では電動機を電気的手段で制御するので、装置を簡単化するうえからも電気的な変速方式が適している。

そこで、筆者らは電磁クラッチを動作させることで所望の減速比をもったギヤに結合する電磁クラッチ式ギヤ変速機構、永久磁石で界磁を構成した永久磁石形直流電動機⁽⁴⁾、力行および回生制動を制御できるサイリスタチョップ⁽⁵⁾を主要素とすることで、電気自動車

に適した、自動変速制御の方式を提案し⁽⁶⁾、その特性⁽⁷⁾を検討したものである。

2. 駆動システム

本論文で検討する電気自動車駆動システムは、永久磁石形直流電動機と電磁クラッチ式変速機を中枢とした方式であり、第1図の構成図で表わされる。

アクセル、ブレーキの2ペダル操作によってサイリスタチョップを動作させ、車の速度調整を行なうシステムを基本とし、シフトレバーが自動位置のときに第2図に示した自動変速制御を行なう。すなわち、現在の走行状態を検出しながらギヤ切換えの必要性を判定(この部分を変速論理と呼称)し、ギヤ切換えが必要となときには現在のギヤを切離し、中立状態にする。この状態でギヤ結合時の衝撃を軽減するために、次に結合するギヤの減速比をもとに、変速機の電動機側回転数と車速側回転数を合わせる制御(これを揃(せん)速制御と呼称)を行なう。この揃速制御が終了した時点に

第1図 自動変速制御装置を用いた電気自動車駆動システム

Fig. 1. Electric vehicle driving system by automatic gear change controller.

Methods and Characteristics of Automatic Gear Change Control for Electric Vehicle. By Tsutomu Ohmae, Member, Katsuzi Marumoto, Member (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.), Hirohisa Yamamura, Non-member (Hitachi Sawa Works, Hitachi Ltd.), Minoru Mitani, Non-member & Shigeharu Masunaga, Non-member (Toyo Kogyo Co., Ltd.).

大前 力: 正員, 日立製作所

丸本勝二: 正員, 日立製作所

山村博久: 非会員, 日立製作所

三谷 稔: 非会員, 東洋工業株式会社

益永茂治: 非会員, 東洋工業株式会社

第2図 自動変速制御の基本動作

Fig. 2. Basic operation of automatic gear change control.

において、再度ギヤを結合し通常の運転動作を行なう。

このような駆動システムにおいては、変速論理および揃速制御とを含む変速制御動作の特性が電気自動車としての性能に大きな影響を与える。

3. 変速論理

どのギヤ位置で走行するかは、電動機の回転数、電流が許容される限り、できるだけ効率が良く、かつ乗り心地の良い位置での運転が望ましい。この点を考慮した変速論理の一方法について詳述する。

〈3・1〉 動力性能条件 各ギヤ位置での変速比を ε_a 、電動機回転数を N_a (a : ギヤ位置を示す) とすると、車速 v は K_n を定数として次式になる。

$$v = K_n N_a / \varepsilon_a \quad (1)$$

(1)式から電動機に許容できる最高回転数を $N_{\max}$ とすると、各ギヤ位置での最高車速 $v_{\max}$ は次式となる。

$$v_{\max} = K_n N_{\max} / \varepsilon_a \quad (2)$$

(2)式から各ギヤ位置での最高車速が限定される。

電動機に流せる最大電流 $I_{\max}$ は、チョップパの通流率が1のときであり次式で表わせる。

$$I_{\max} = (V_{B0} - K_e N_a) / (R_B + R_m) \quad (3)$$

但し、 V_{B0} : バッテリの無負荷電圧、 K_e : 電動機の誘起電圧係数、 R_B : バッテリの内部抵抗、 R_m : バッテリから電動機側の抵抗の総和。

ところで、電動機に流しうる電流は電動機およびチョップパによって限定されているのが普通である。このためにチョップパ制御回路では、電動機電流を一定値 I_l 以下に抑制している。このことを考慮すると、各ギヤ位置での最大駆動力 $F_{\max}$ は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} F_{\max} &= K_f \varepsilon_a I_l \quad (N_a \leq N_{a0}) \\ &= K_f \varepsilon_a I_{\max} \quad (N_a > N_{a0}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

但し、 $N_{a0} = (V_{B0} - (R_B + R_m) I_l) / K_e$ 、 K_f : 定数である。また、 I_l はチョップパで制限される電動機電流平均値の上限、 N_{a0} は I_l を流せなくなる回転数である。

〈3・2〉 効率条件 (2)、(4)式で制限される条件は動力性能によって決まる限界条件であり、限界値以下の動作領域では複数のギヤ位置を選択できる領域がある。この領域を走行する場合には、電気自動車の走行距離を伸ばすために効率の最も良いギヤ位置で走行するのがよい。この点から効率条件を変速論理に含めて検討する。

電動機および制御装置の全損失 W_{la} は、永久磁石形直流電動機を用いていることから電動機回転数 N_a 、電動機電流 I_{ma} を用いて次式で近似できる。

$$W_{la} = K_1 I_{ma} + K_2 I_{ma}^2 + K_3 N_a + K_4 N_a^2 + W_0 \quad (5)$$

但し、第1項: ブラシ電気損、サイリスタのえん層電圧などによる損失、第2項: 電機子および回路の銅損、サイリスタの順電圧降下による損失など、第3項: ブラシ摩擦損、ベアリング損+風損など、第4項: 鉄損など、第5項: 制御回路電源など回転数 N_a 、電流 I_{ma} に関係しない固定損とする。

いま、車が速度 v 、駆動力 F で走行しているとすると、電動機の回転数 N_a 、電流 I_{ma} は(1)、(4)式から次式となる。

$$\left. \begin{aligned} N_a &= \varepsilon_a v / K_n \\ I_{ma} &= F / K_f \varepsilon_a \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(6)式を(5)式に代入すると a 速での全損失 W_{la} は次式になる。

$$W_{la} = K_1 (F / K_f \varepsilon_a) + K_2 (F / K_f \varepsilon_a)^2 + K_3 (\varepsilon_a v / K_n) + K_4 (\varepsilon_a v / K_n)^2 + W_0 \quad (7)$$

(7)式をもとに 1, 2 速での損失を比較し、 $W_{11} \leq W_{12}$ となる v, F の範囲を求めると次式になる。

$$v \leq (\alpha_0 + \sqrt{g(F)}) / \alpha_1 \quad (8)$$

但し、 $\alpha_0, \alpha_1, g(F)$ は次式である。

$$\alpha_0 = -K_3 / K_n, \alpha_1 = 2K_4 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / K_n^2 \quad (9)$$

$$g(F) = \alpha_0^2 + 2\alpha_1 \{ K_2 F^2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / (K_f \varepsilon_1 \varepsilon_2)^2 + K_1 F / K_f \varepsilon_1 \varepsilon_2 \} \quad (10)$$

(8)式を満足するような v, F のときは、1速のギヤ位置で運転すればよい。また、(8)式を満足しない $W_{11} > W_{12}$ のときには、2速か3速のギヤ位置を選択することになり、2, 3速間における(8)式と同様な式[(9)、(10)式の ε_1 を ε_2 に、 ε_2 を ε_3 におきかえた式]

を用いて判定すればよい。

〈3・3〉 その他の条件 以上に掲げた条件は、動力性能および効率の点から、定量的に得られるものである。これに対して乗り心地、操作性を向上させるための変速論理としてガソリンエンジン自動車での経験から下記の条件を設けている。

(a) 各ギヤ位置での最低車速の設定 これは車庫入れなどの低速走行時において、ひん繁な変速動作を行なうことで操作性を悪くすることを避けるものである。

(b) アクセルペダル踏み込み量による変速 この場合には、乗り心地および操作性の点から二つの条件がある。第1の条件は、アクセルペダルを少し踏込んだだけでギヤ切換えを行なうような不都合な動作を避け、乗り心地を向上させるものである。第2の条件はアクセルペダルの踏み込み量が最大となったときに減速比の小さなギヤ位置に変速する、すなわちキックダウン動作を行なわせるものである。この機能は急加速が短時間のうちに可能となり操作性を向上させる。

以上の条件をまとめると、第3図の領域に後述するアクセルペダルの論理を追加した変速論理となる。

第3図は、(2)、(4)式の動力性能条件と効率条件および最低車速条件を含めて示したものである。現在走行している車速 v と駆動力 F を常に検出し、その組み合わせが図中の1速などと示した領域では、そのギヤ位置で走行すればよいことを示している。このことから、各領域の境界線上を v, F が越えた時点でギヤ切換えが行なわれる。但し、後章で述べるように、この境界線上を運転する場合の安定性を確保させるために、この境界線にヒステリシス特性を設けることが必要となる。また、 l_2 のように v に応じて F が変化するような領域は実用的でなく、簡単なものがよい。こ

第3図 各ギヤ位置での運転領域

Fig. 3. Operation range at respective gear positions.

れらのことを考慮すると、2速と3速の境界線は、例えば第3図の点線で示したものが実的な一方式として考えられる。なお、斜線で示した部分がヒステリシス特性を得るための領域である。

また、アクセルペダルの論理については、下記の論理となっており、第3図の領域から決まる論理に優先して処理される。

(i) アクセルペダルの踏込量が最大で、かつシフトダウン可能車速のとき……シフトダウン

(ii) アクセルペダルの踏込量が一定値（比較的小さな値）以下……変速しない

4. 変速制御

〈4・1〉 動作 変速制御は、変速指令が入ってから所望のギヤに結合するまでの一連の動作を行なう。この制御のタイムチャートは一般に第4図となり下記のシーケンスを実行する。

(a) ギヤの離脱 変速指令の発生と共にチョップ動作を停止し、現在結合されているギヤを切離す。この状態を一定時間 t_a の間続ける。

(2) 揃速制御 ギヤが中立状態において、電動機回転数を結合するギヤ位置に適した値に制御するものである。すなわち、2速のギヤ位置で走行していたとすると、そのときの電動機回転数 N_2 は(1)式から次式となる。

$$N_2 = \varepsilon_2 v / K_n \dots\dots\dots (11)$$

次に、1速で運転するためには、ギヤ結合時の車速側回転数を変速前と同じにすることから、電動機の回転数 N_1 を次式の値とする必要がある。

$$N_1 = \varepsilon_1 v / K_n \dots\dots\dots (12)$$

このために、次式で表わされる回転数差 ΔN を上昇させる必要があり、この動作が揃速制御である。

$$\Delta N = N_1 - N_2 = v(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) / K_n \dots\dots\dots (13)$$

(c) ギヤの結合 揃速制御終了後に電磁クラッ

第4図 変速制御のタイムチャート

Fig. 4. Time chart of gear change control.

チを動作させギヤの結合を行なう。この状態は、ギヤが完全に結合されるまでの一定時間 t_b の間継続する。

(d) 通常運転への復帰 ギヤ結合後に通常のアクセルまたはブレーキペダルに応じたチョップ動作を行なう。この場合に、電流が所望の値近くまで立上る時間 t_m の間は、トルクが少なく脱力感を運転者に与える。

このような変速制御系の特性は、乗り心地に大きな影響を与える。特に、

(i) 変速時間 ($t_a + t_s + t_b + t_m$) が長いことによる脱力感

(ii) ギヤ結合時の揃速誤差による衝撃が問題となる。

以下、これらについて解析を行なう。

<4.2> 変速時間 変速時間としてかかる時間のうち t_a および t_b は、電磁クラッチの動作時間で決定されるものであり一定と考えてよい。そこで、以下は t_s および t_m について考える。

まず、第1図の系の力行時の構成図を求めると第5図になる。但し、次の仮定を設けている。

(i) 電動機の最大電流を制限する。

(ii) アクセルペダルの急変時に過大な電流を流さないために、チョップ制御回路は一次遅れ系とする。

(iii) 過渡現象に着目して比較的大きな電流が流れる場合について解析するので、チョップの出力電圧が電動機の誘起電圧より低い場合には電流が流れないものとする。

第5図のうち、実線の部分がアクセルペダルに応じて動作する系であり、揃速制御時にはアクセルペダルからの信号がなくなり、破線で示した系が加わった構成となる。なお、第5図の揃速制御系はシフトダウンの場合を示している。

ところで、揃速制御はギヤを中立位置にした状態での制御であること、およびチョップ制御回路の遅れ時

間が比較的大きいことを考えると、次の仮定が成り立つ。

(i) 車速 v は揃速制御中には変化しない。

(ii) ギヤが中立位置であり、電動機出力トルクに対し負荷トルクは小さいので無視する。

(iii) 電機子回路、検出回路の遅れはチョップ制御回路の遅れに対して小さいので無視する。

(iv) 揃速制御中には制限値に達するような電流は流れない。

上記のような仮定を設けると、第5図の揃速制御系は第6図で表わされる。第6図の系から揃速時間 t_s は、電流が流れるまでの時間 t_{s1} 、電流が流れてから揃速終了までの時間 t_{s2} に分けて解析できる。

時間 t_{s1} はチョップ出力電圧の平均値 V_{CH} と電動機の誘起電圧 V_e が等しくなるまでの時間であるから次式が成り立つ。

$$K_c(N_c - N_0)(1 - e^{-t_{s1}/T_{ca}}) = K_e N_0 \dots (14)$$

但し、 N_e は揃速制御時の電動機回転数の目標値、 N_0 は揃速開始時の電動機回転数である。

いま、2速から1速へのシフトダウンとすると $N_e = N_1$ 、 $N_0 = N_2$ となり、(11)、(12)式を(14)式に代入すると次式が得られる。

$$t_{s1} = T_{ca} \ln(1 - K_e \varepsilon_2 / K_c (\varepsilon_1 - \varepsilon_2))^{-1} \dots (15)$$

(15)式から、 t_{s1} は変速時点の車速 v によらず系の定数と変速比によって決められた値となる。

第6図 揃速制御系のブロック線図

Fig. 6. Block diagram of system to control motor speeds.

第5図 駆動システムのブロック線図

Fig. 5. Block diagram of driving system.

電流が流れ始めた以後の電動機回転数 $N(t)$ は次式となる。

$$N(t) = \beta N_c + (N_0 - \beta N_c) e^{-\zeta \omega_n t} \times \cos(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t - \phi) / \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} \omega_n &= \sqrt{K_d(K_c + K_e)/T_{ca}} \\ \beta &= K_c/(K_c + K_e) \\ \zeta &= (K_d K_e + 1/T_{ca})/2\omega_n \\ \phi &= \tan^{-1}(\zeta/\sqrt{1 - \zeta^2}) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

(16)式から t_{s2} は次式を満足する値となる。

$$N(t_{s2}) = N_c \quad (18)$$

(18)式に(11), (12), (16)を代入すると次式が得られる。

$$e^{-\zeta \omega_n t_{s2}} \cos(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t_{s2} - \phi) = \sqrt{1 - \zeta^2} (1 - \beta) / (\varepsilon_2 / \varepsilon_1 - \beta) \quad (19)$$

(19)式から, t_{s2} も変速時点の車速 v によらず系の定数と変速比によって決められた値となる。

通常運転へ復帰させるときの電流の遅れ時間 t_m (定常値の 90% で定義) は, キックダウン動作のように最大電流で車を走行させる場合が乗り心地としての影響が大きい。そこで, このときの値を求める。

この場合には, ギヤは結合されている状態であるから, t_m の間の回転数変化は無視できる。また, アクセルペタルの踏込量 θ_a は t_m の間一定と考えられる。

まず, チョップパ出力電圧が, 誘起電圧より低い時間 t_{m1} は, (14)式と同様になり, 次式となる。

$$t_{m1} = T_{ca} \ln(1 - K_e N_0 / K_d \theta_a)^{-1} \quad (20)$$

但し, $K_d = K_\theta K_{ca} V_B$ である。

また, 電流が流れ始めてから電流制限値 I_l の 90% に達するまでの時間 t_{m2} は第5図から次式となる。

$$t_{m2} = T_{ca} \ln(1 - 0.9 R I_l / (K_d \theta_a - K_e N_0))^{-1} \quad (21)$$

〈4.3〉 揃速誤差 揃速制御は第5図で偏差 e_N が零になったことを検出して, チョップパをオフすると共に電磁クラッチを動作させてギヤを併合する。この場合に, 電動機軸側と車輪軸側との回転数に差があると衝撃を感じる。この回転数差のことを揃速誤差と呼称し以下に検討する。

揃速誤差となる要因として, 次の事項が考えられる。

- (i) 車速, 回転数検出回路を含む制御回路の精度
- (ii) チョップパ停止後の電流による回転数の増加
- (iii) 回転数検出回路の遅れ時間

上記の項目のうち, 第1項については回路構成によ

って, 1% 以下の精度とすることは容易である。第2項についてはチョップパ停止後にフライホイールダイオードを介して減衰する電流であるが, 1ms 以下程度の間しか流れないので, 回転数の増加分は 0.5% 以下である。第3項については, 遅れが大きいと揃速を停止させたときに実際の回転数は, 所望の回転数に対して行き過ぎを生ずる。いま, 過渡応答は(16)式となり, チョップパ停止が T_N だけ遅れたとすると, この遅れによる揃速誤差は e_{NT} 次式で近似できる。

$$e_{NT} = N(t_{s2} + T_N) - N(t_{s2}) = (\beta N_c - N_0) e^{-\zeta \omega_n t_{s2}} / \sqrt{1 - \zeta^2} \times \{\cos(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t_{s2} - \phi) - e^{-\zeta \omega_n T_N} \times \cos(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} (t_{s2} + T_N) - \phi)\} \dots (22)$$

制御系の利得 K_e を大きくすると, (17)式から β , ω_n が大きくなり, ζ , ϕ が小さくなる。また, $\zeta \omega_n$ は一定である。これらを用いると, 揃速誤差 e_{NT} は(22)式から K_e を大きくすればするほど大きくなるのがわかる。このことは, 揃速時間を小さくすればするほど, 揃速誤差が大きくなることを意味している。揃速時間は高速走行時の脱力感として, 揃速誤差はギヤ結合時の衝撃として, いずれも乗り心地に影響するので, これらを総合的に判断することで揃速制御系の利得の最適値が決定できる。

5. 実験結果の検討

本章においては, 軽量電気トラック用として試作した装置による実験結果について説明する。

〈5.1〉 試作装置の概要 試作した装置は第1図の構成を実現したものである。駆動用電動機としては, 電気自動車用として開発された 12kW 永久磁石形直流電動機⁽⁴⁾である。電動機を駆動するサイリスタチョップパは第7図の構成である⁽⁵⁾。バッテリー電圧を2段に切換えることで低脈流化を図ると共に, 3個のサイ

B_1, B_2 : バッテリー, S_{01}, S_{02}, S_3 : 逆阻止サイリスタ, S_{01}, S_1, S_2 : 逆導通サイリスタ, D_F : ダイオード, DCL : 直流リアクトル, DCM : 直流電動機, C_0 : 転流コンデンサ, L_0 : 転流リアクトル

第7図 サイリスタチョップパ

Fig. 7. Thyristor chopper.

第 8 図 自動変速機の構造

Fig. 8. Structure of automatic transmission.

第 9 図 チョップパ制御回路

Fig. 9. Chopper control circuit.

第 10 図 自動変速制御回路

Fig. 10. Automatic gear change control circuit.

リスタ S_1 , S_2 , S_3 を力行と回生制動用に共用して用いている。変速機は第 8 図の構造であり、自動変速機と終減速機を一体化して納めてある。2, 3 速が電磁クラッチによって、セカンダリ・シャフトに欠脱できる構造としてある。なお、車速検出、回転数検出は、それぞれ変速機、電動機内部に近接スイッチと歯車を設けてパルス周波数検出によって行なっている。

これらの構成要素を制御する回路は第 9 図、第 10 図である。力行時にはアクセル装置の出力に応じたチョップパ電圧を印加すると共に、最大電流を制限する系となっている。回生制動時には、ブレーキ装置の出力と電気制動力を比例させるために電流制御系としている。

自動変速制御回路は第 10 図の構成となっており、2, 3 速間の変速だけを自動的に行ない、1 速(第 10 図

第 11 図 電動機回転数と全損失の関係

Fig. 11. Relation between motor speed and total losses.

第 12 図 効率条件による最適ギヤ位置

Fig. 12. Optimum gear position according to efficiency.

の L) は揃速制御だけを自動的に行なう。

〈5・2〉 変速論理の検討 電動機とチョップパを組合わせて全損失 W_t を測定すると第 11 図になる。(5)式を用いて計算した値と実験値は動作点によって多少の違いは見られるが、傾向として良く一致している。なお、実験値の損失は回転数の増加に伴って、二つのピークがみられるが、これはバッテリー電圧の2段切換えおよびチョップパ周波数を可変していることによる。

第 12 図は、第 11 図をもとに損失が最も少なくなるギヤ位置の境界線を示したものである。この図からも、実験値と計算値の傾向がほぼ一致している。

ところで、第 12 図の効率による変速曲線は車速に応じて変化しているが、実際の装置では単純な回路がよい。この点から、第 13 図のような変速領域を設定した。効率による変速は一般に 2 速で運転している状

第 13 図 試作装置の運転領域

Fig. 13. Operation range of experimental device.

態から 3 速に切替えるもので、第 12 図の曲線 I_2 を参考にして電流が 90 A 以下で切替えている。逆に 3 速から 2 速への変速は、3 速の電流で 250 A 以上としヒステリシスを設けることで変速論理の安定性を高めている。なお、第 13 図の変速領域では、構成を簡単化しているから必ずしもすべての走行状態で最高効率の運転とはならない。しかし、40 km/h 平坦路走行のようによく運転される状態では、最高効率で運転可能であり、回路構成も簡単であるから実用的な方式といえる。なお、第 13 図の他に、アクセルペダルを最大に踏込んだときにシフトダウンする、いわゆるキックダウンが変速論理に加わっている。

〈5・3〉変速制御の特性 第 14 図は、揃速時間 t_s と揃速制御系の利得 K_c との関係を示す。図から、(15)、(19) 式を用いて近似的に t_s が計算できることがわかる。また、電流が流れ始めるまでの時間 t_{s1} は揃速時間 t_s の 30% 弱であり、比較的大きな割合を占める。なお、実測値では 30 km/h で変速させた場合の方の t_s が 40 km/h のときの t_s より小さい

第 14 図 制御利得と揃速時間の関係

Fig. 14. Relation between control gain and time required to control.

第 15 図 制御利得と揃速誤差の関係

Fig. 15. Relation between control gain and error in controlling motor speeds.

第 16 図 電流遅れ時間の特性

Fig. 16. Characteristics of time lag of electric current.

第 17 図 電流遅れ時間の補償

Fig. 17. Compensation for time lag of electric current.

が、これは揃速制御回路の増幅器の飽和特性の影響が現われたものと思われる。

第 15 図は系の利得 K_c に対する揃速誤差 e_{NT} の関係である。回転数検出回路に、25 ms 程度の遅れがあるために誤差が生じている。なお、試作車での乗り心地から判断すると、200 rpm 以下程度の揃速誤差なら衝撃はほとんど感じない。このことから利得 K_c は 0.2 程度で、揃速時間 t_s は 0.27 s 程度になる。

次に、キックダウン動作で変速した後の電流の立ち上がり時間を測定したのが第 16 図であり、実際にトルクが伝達されるまで多くの時間がかかっている。この

電動機電流

電動機回転数
車 速

2速電磁734

3速電磁734

バッテリー電流

アークセル信号

ブレーキ信号

ギアアップ信号

第 18 図 軽量電気トラックにおける自動変速制御特性

Fig. 18. Characteristics of automatic gear change control on lightweight electric vehicle.

時間は、第 17 図(a)の動作波形からもわかるように
 揃速時間 t_s よりも大きくなっている。そこで、この
 点を改良するために、電磁クラッチを結合し、チョッ
 パ動作を再開したときに車速に応じたダンピング補償
 を行なった。この結果、 t_m は変速時点の車速にほとん
 ど関係なく 0.12s と小さな値になった。

以上の結果から、変速時間は最大でも 0.58s 以下
 ($t_a=0.13s$, $t_s=0.28s$, $t_b=0.05s$, $t_m=0.12s$) となり
 脱力感をあまり感ぜず乗り心地の良い変速時性が得ら
 れた。更に、第 18 図は 25km/h キックダウン、45
 km/h, 55km/h での変速を実車走行で確認した波形で
 あり、シフトアップ、ダウンとも良好な自動変速動作
 を行なうことがわかった。

6. あとがき

ギヤ変速機構を備えた電気自動車駆動システムでは
 操作性向上のためにも、自動変速制御方式の開発が重
 要となっている。本論文では、この点について検討を
 行なった。

最初に、現在の走行状態を検出して最適なギヤ位置
 を選定する変速論理について検討し、動力性能条件に
 効率条件を加えた方式を提案した。そして、この方式
 における設計方法を示し、実験的に確認した。

次に、ギヤを欠・脱する変速制御の過渡現象を解析
 し、変速時間、揃速誤差の近似計算方法を明らかにす

ると共に、変速時間を短縮する制御方式を示した。

これらの検討結果をもとに試作した制御装置を軽量
 電気トラックに装備して実車走行をさせた結果、各計
 算方法が実験的に確認され、0.58s 以下の変速時間で
 すべてのモードの自動変速が行なわれ、実用上乗り心
 地の良い装置であることがわかった。

なお、本論文ではシフトアップだけについて解析手
 法を示したが、シフトダウンの場合でも揃速制御が回
 生制動動作となるだけですべて同じ手法で解析でき
 る。

最後に、本研究は通産省大形プロジェクト「電気自
 動車の研究開発」の一環として行なったものであり、
 工業技術院関係諸氏、東京電機大 宮入庄太教授、前田
 明志教授、東京大学 原島文雄助教授、東洋工業(株)
 松井取締役、日立製作所 渡辺部長、笠間部長を始め
 とする関係諸氏に厚く感謝の意を表します。

(昭和 53 年 6 月 22 受付)

文 献

- (1) 通産省工業技術院：電気自動車の研究開発 (昭 52-9)
- (2) 多田隼，他：電学論B, 96, 25 (昭 51-2)
- (3) 自動車技術会：自動工学ハンドブック 5-20 (昭 45-6)
- (4) 田島，他：昭51電気学会全大 No. 542
- (5) 柴田，他：昭50電気学会全大 No. 796
- (6) 大前，他：昭52電気学会全大 No. 998
- (7) 大前，他：昭52電気学会全大 No. 999