

# 電気二重層キャパシタを用いた昇圧形モータドライバのシミュレーションによる動作検証\*

松 本 洋 和\*\*

## Research of Boost Motor Driver with Electric Double Layer Capacitor by Simulation

Hirokazu MATSUMOTO

Industrial motor drivers, especially servo drivers, trend to be used in high voltage, to reduce the loss in motors and drivers and obtain a high movement response of motors. It is useful to develop a boost motor drive.

In this paper, a novel boost motor driver is suggested. It is with Electric Double Layer Capacitor (ELDC). Servo drivers require higher input power than the rated power, because servo motors are drove in three or four times higher instantaneous peak torque than the rated one. So, the power equipments over the rated power must be installed in the factories using servo drivers. The suggested driver can reduce the instantaneous input power by using charged energy in the EDLC. The EDLC also enable the driver to charge and use regenerated energy, which is lost in a resistor in conventional drivers. Such works of the suggested driver are researched in simulation and compared with that of single-phase voltage-double driver.

*Key Words:* Servo Driver, Boost Motor Driver, ELDC, Regeneration Energy

### 1. まえがき

近年、産業用モータドライバ、中でもサーボシステムに用いられているサーボドライバは、モータおよびドライバ内での低ロス化、及び、モータ出力の高応答化追求のために使用電源が高電圧化の傾向にある。しかし既存の工場電源を高電圧化することはコスト・労力の面から簡単ではない。そのためモータドライバ内で工場電源を昇圧することが考えられる。その方法として単相倍電圧方式や昇圧チョッパ

などが挙げられる。ところでサーボドライバではモータの加減速時には、電力ピークは定格の300～400%に達する。そのため工場電源にはこのピークに合わせた入力電源容量が必要となる。先に挙げた昇圧方式はこの問題までも解決をしてくれるものではない。

本論文では電気二重層キャパシタ (ELDC: Electric Double Layer Capacitor)を用いた昇圧形モータドライバを提案する。本ドライバは入力電源を昇圧するとともに、モータ加速時に必要な電力ピークを低減可能である。さらに小中容量のサーボドライバでは、抵抗で消費されていた回生エネルギーをELDCへと充電することにより省エネにも貢献可能

\* 平成20年5月30日受付

\*\* 電気工学科

である。

この提案する昇圧形モータドライバにおいてシミュレーションを実施し、モータドライバとしてメーカ採用実績のある単相倍電圧回路と比較することにより、上記動作特性を検証する。

## 2. 回路構成

図1に、ELDCを用いた昇圧形モータドライバを示す。図中のコンデンサのうち $C_1$ はELDC、 $C_2$ 、 $C_3$ は電解コンデンサである。この提案昇圧ドライバの昇圧方法は、充電されたELDC ( $e_1$ )が、AC電源を整流平滑した電圧 $e_2$ に直列に接続されることによりチャージポンプとして働き、インバータ入力電圧 $e_3$ を昇圧するものである。

ELDCは、非常に大きな静電容量を持ち、また電解コンデンサのように高速充放電可能という特性をもつため近年注目されている<sup>(1)</sup>。モータ加減速中は大きな電流が流れるため、電解コンデンサのような数mF程度の静電容量では電圧の変動が大きく、本ドライバのような電圧制御を行わないチャージポンプとして適さない。以下にモータ加減速運転におけるELDCの電圧変動式を示す。

単相AC入力106.1Vを倍電圧し定格出力 $P=3.5\text{kW}$ のモータを定格トルクの $x=300\%$ で定格速度2000rpmまで $T=0.32\text{s}$ で加速するとする。また回路定数は $C_1=9.67\text{F}$ 、 $C_2=2.0\text{mF}$ 、 $C_3=0.25\text{mF}$ である。

加速に必要な全エネルギー $W_m$ は

$$W_m = \frac{1}{2} P \frac{x}{100} T \quad (1)$$

である。またELDCの電圧 $e_1$ は、充電エネルギーの変動 $\Delta W_c$ に対し以下ようになる。

$$\Delta W_c = \frac{1}{2} C_1 (e_1^2 - e_{10}^2) \quad (2)$$

ここで $e_{10}$ は初期充電電圧である。条件は倍電圧であるため $e_2=e_{10}=150.0\text{V}$ となる。また各コンデンサの静電容量値より、 $C_1$ の電圧変動は初期充電電圧に対して小さいこと、 $C_3$ から出力されるエネルギーを無視できるとすると

$$\Delta W_c = -1/2 W_m \quad (3)$$

となる。以上から加速終了後の電圧 $e_{1a}$ は

$$e_{1a} = \sqrt{e_{10}^2 - \frac{PxT}{200C_1}} \quad (4)$$

と表わされる。条件値より $e_{1a}$ は149.4Vとなり、電圧低下は非常に小さい。

回生時には、回生電流がELDCを流れることにより回生エネルギーが充電されるとともに、 $C_2$ へと充電されるエネルギーは、チョークコイル $L_1=4.0\text{mH}$ 、スイッチ $S_1$ 、ダイオード $D_1$ からなる充電回路を通してELDCへ送られる。図2に充電動作モードを示す。破線と矢印で(a) $S_1=ON$ 時 (b) $S_1=OFF$ 時の電流の流れを示している。これにより、多くの回生エネルギーをELDCで充電可能となる。

定格 $x=300\%$ のトルクで定格速度から0rpmまで $T=0.32\text{s}$ で減速した場合を考える。充電回路により全回生エネルギーをELDCで充電可能であるとすると

$$\Delta W_c = W_m \quad (5)$$

式(1)と式(2)、式(5)よりモータ減速終了時の電圧 $e_{1d}$ は以下ようになる。

$$e_{1d} = \sqrt{e_{10}^2 + \frac{PxT}{100C_1}} \quad (6)$$

$e_{10}$ が加速終了後の電圧 $e_{1a}$ であるとする、 $e_{1d}$ は150.6Vとなる。以上からモータ加減速運転によるELDCの電圧変動はごくわずかであり、電圧制御を行わなくとも、十分にチャージポンプとしての機能を果たすことが可能である。

## 3. シミュレーション結果

シミュレーションはPSIMを用いて行った。回路定数及びモータ駆動パターンは前節の条件を使用している。またELDCは電解コンデンサに比べて等価内部抵抗値が大きいため、ELDCに抵抗0.456を直列接続しELDCシミュレーションモデルとした(図3参照)。

図3にモータ駆動制御および充電回路制御構成を示す。モータ駆動制御は電流制御をマイナーループとして持つ速度ループで構成される。充電回路は $e_3$ を監視し、 $e_3$ が $e_{limit}$ を超えた場合、充電動作を始める。

比較のため、図4に示す単相倍電圧ドライバにおいても、同じ運転パターンでシミュレーションを行った。R<sub>1</sub>は回生抵抗、S<sub>2</sub>は回生スイッチである。インバータ入力電圧 $e_6$ が $e_{limit}$ を超えた場合に回生スイッチはONする。回路定数は $R_1=13$ 、 $C_4=4.0mF$ 、 $C_5=4.0mF$ 、 $C_6=2.0mF$ である。

$e_{limit}$ は提案昇圧昇圧ドライバ、単相倍電圧ドライバともに350.0Vとする。

図5、図6にそれぞれシミュレーション結果を示す。図(a)、(b)はモータ速度、モータトルクを示している。高速域でトルクが大幅に減衰し、モータ速度が1800rpmにも達していない単相倍電圧ドライバに比べると、提案昇圧ドライバの駆動特性は若干のトルクの減衰があるものの良好といえる。このトルクの減衰の要因の一つは、図(c)に挙げる直流電圧の低下である。単相倍電圧ドライバではトルクの減衰が顕著であるために、高速域では上昇に転じているが、0.2s時の電圧平均低下量をみると、単相倍電圧回路が約80Vなのに対し、提案ドライバは約40Vである。提案昇圧ドライバの電圧低下量のうち約15VがELDCの内部等価抵抗による電圧低下であり、残りは電解コンデンサ $C_2$ の充電電圧の低下である。ただし内部等価抵抗を含まないELDCの電圧 $e_1$ は、150Vを保っておりチャージポンプとしての役割を十分に果たしている。提案昇圧ドライバは単相倍電圧ドライバに比べ、電圧が安定していることがわかる。

図(d)はドライバへの瞬時入力電力を示す。0.2sに至るまでの提案昇圧ドライバの瞬時電力上昇の傾きは、単相倍電圧ドライバの半分である。これにより提案昇圧ドライバはピーク電力を低減可能である

ことがわかる。

図(e)に蓄えられるエネルギーと消費されるエネルギーを示す。駆動により、モータに蓄えられる運動エネルギーは約1500Jである。単相倍電圧ドライバでは内1200Jが回生抵抗で消費されている。対して提案昇圧ドライバではELDCの内部等価抵抗で250J消費されるものの、1300JがELDCに充電され再利用可能である。

図(f)は直流電流 $i_{c1}$ 、 $i_p$ と充電電流 $i_{L1}$ 、回生抵抗電流 $i_{R1}$ を示している。直流電圧が $e_{limit}$ に達すると充電回路が動作し、電解コンデンサ $C_2$ の電圧上昇を防ぐとともに、エネルギーをELDCへと送っていることが確認できる。

#### 4. むすび

EDLCを用いた昇圧形モータドライバを提案し、その動作特性をシミュレーションにより検証した。ELDCをチャージポンプとして用いることにより、単相倍電圧ドライバと比べ安定した昇圧が可能であり、優れたモータ駆動特性が得られることを示した。さらに加速時に瞬時入力電力を低減可能であることも示した。また充電回路を用いて回生電力をELDCに送ることにより、回生電力を抵抗で消費することなく有効利用可能であることを示した。

今後は実験により、EDLCを用いた昇圧形モータドライバの動作を検証していく予定である。

#### 参 考 文 献

- (1) 岡村：「電気二重層キャパシタと蓄電システム - 第3版 -」, 日刊工業新聞, (2005 9)

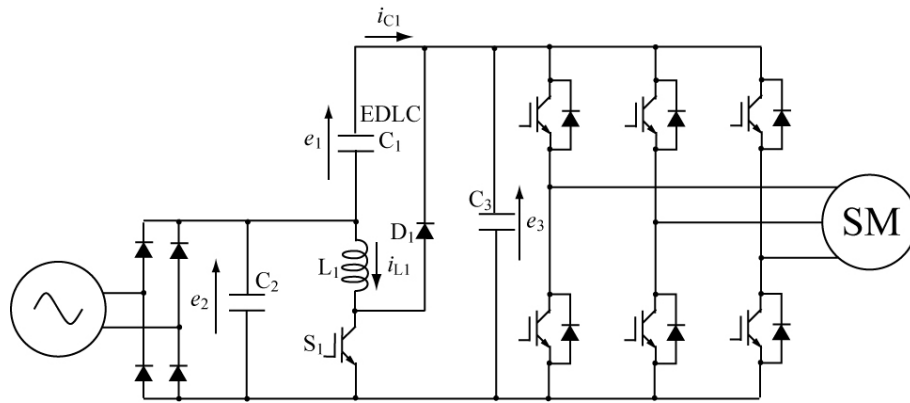


図1 システム構成  
Fig.1 System configuration

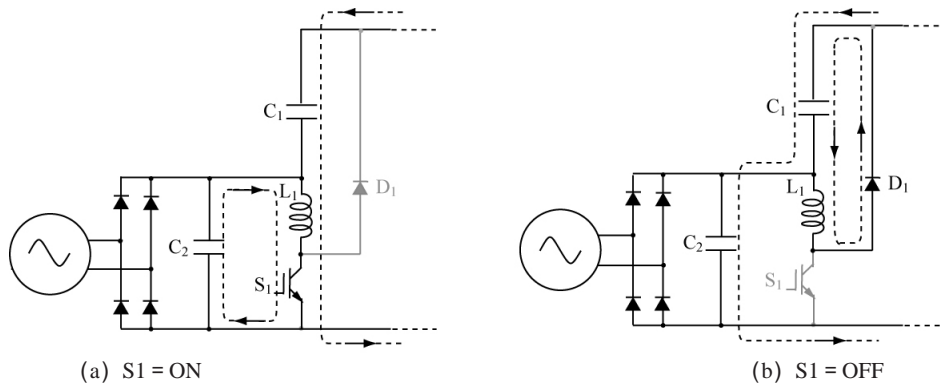


図2 充電動作モード  
Fig.2 ELDC charging mode

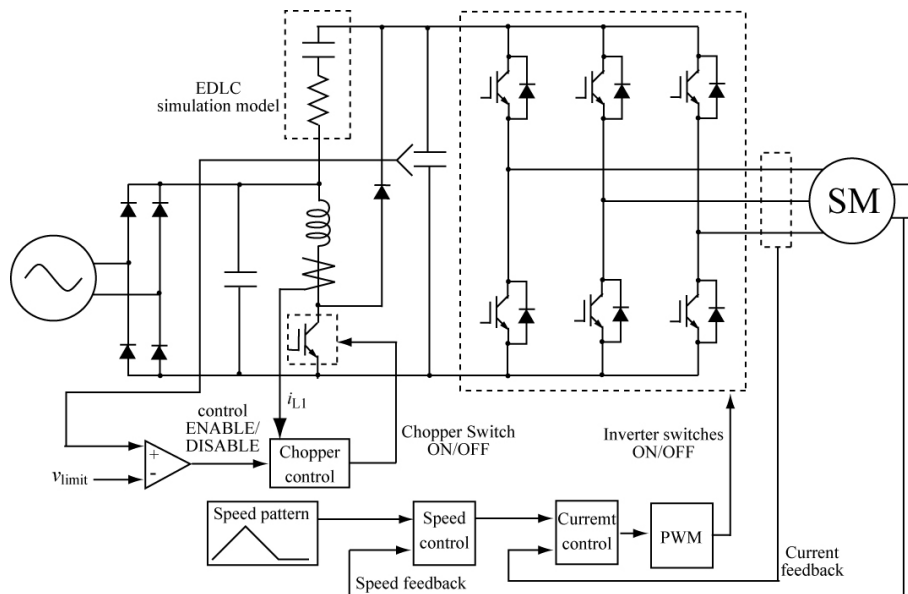


図3 制御構成と ELDC シミュレーションモデル  
Fig.3 Control diagram and ELDC simulation model

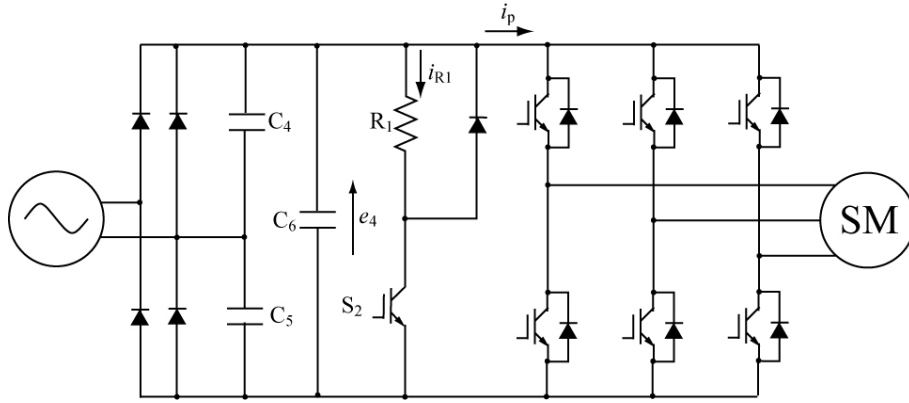
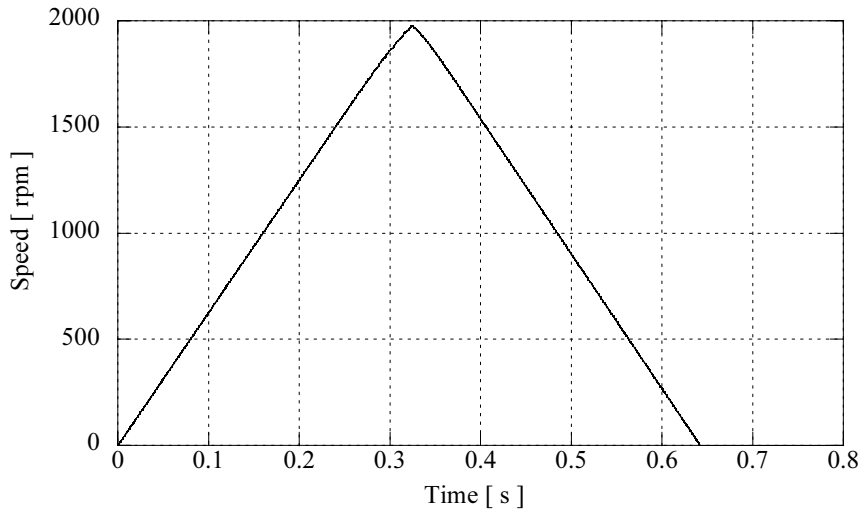
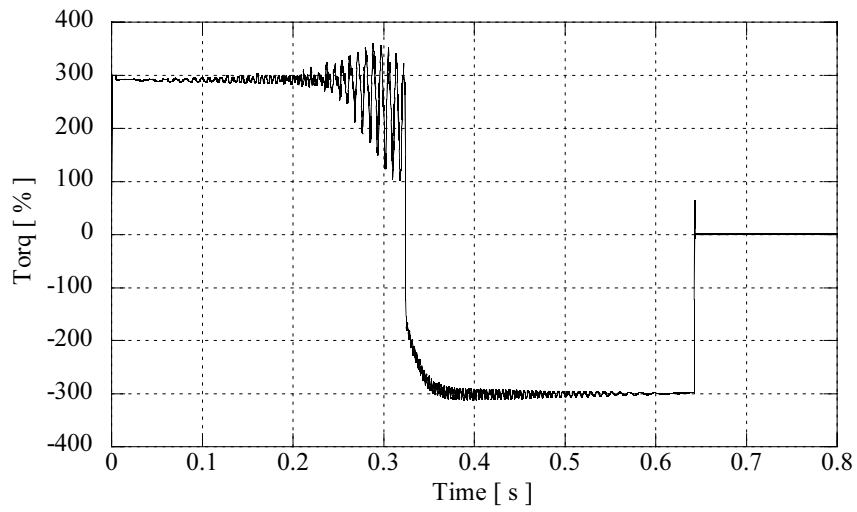


図4 単相倍電圧回路

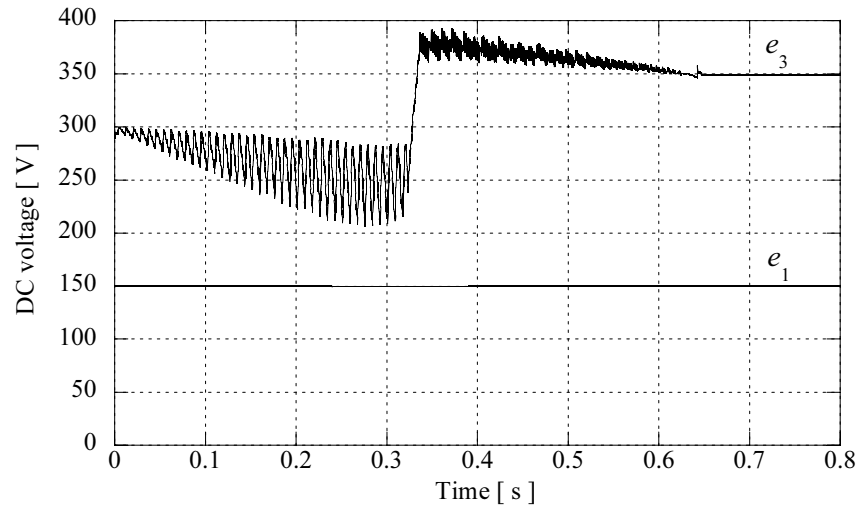
Fig.4 Single-phase voltage-double motor driver



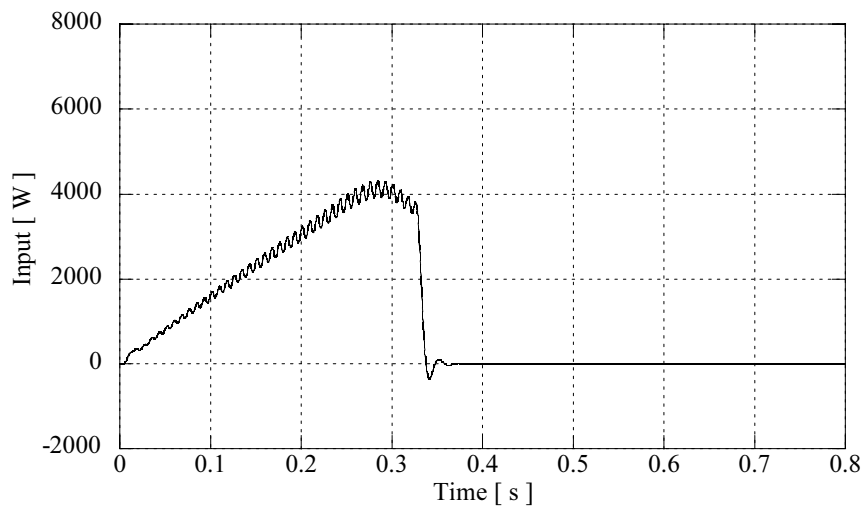
(a) Motor speed



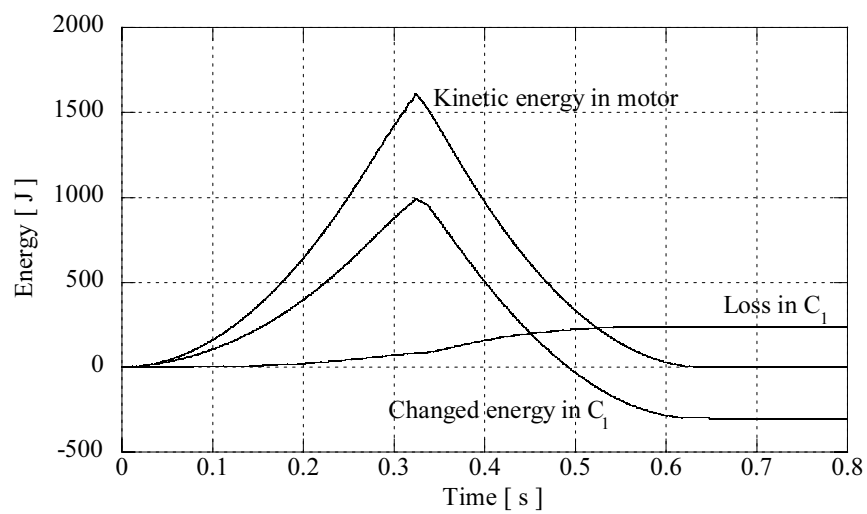
(b) Motor torque



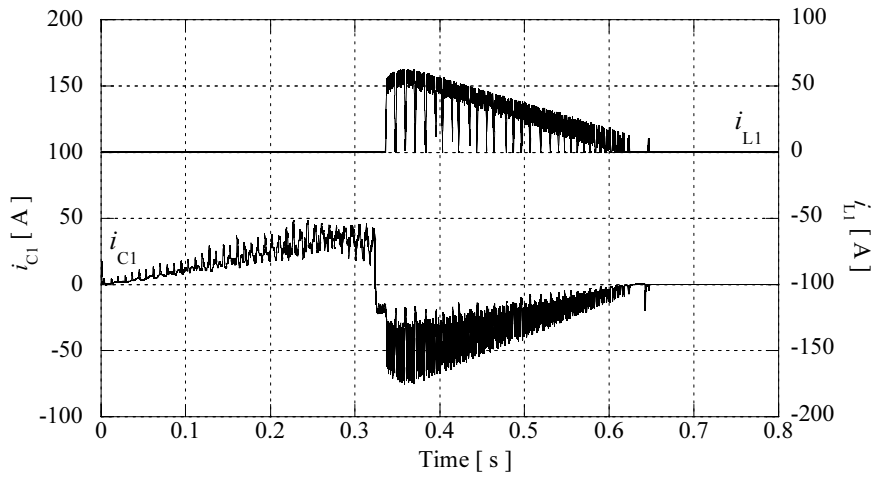
(c) DC voltage



(d) Input power

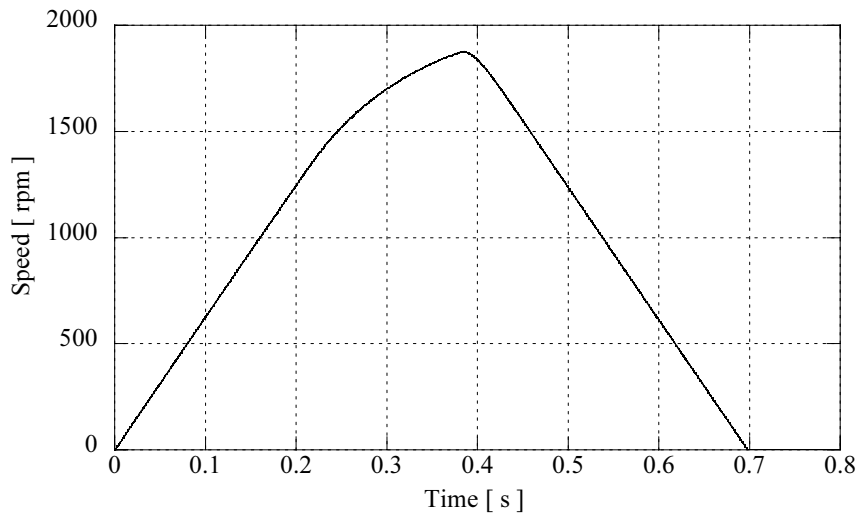


(e) Loss and charged energies

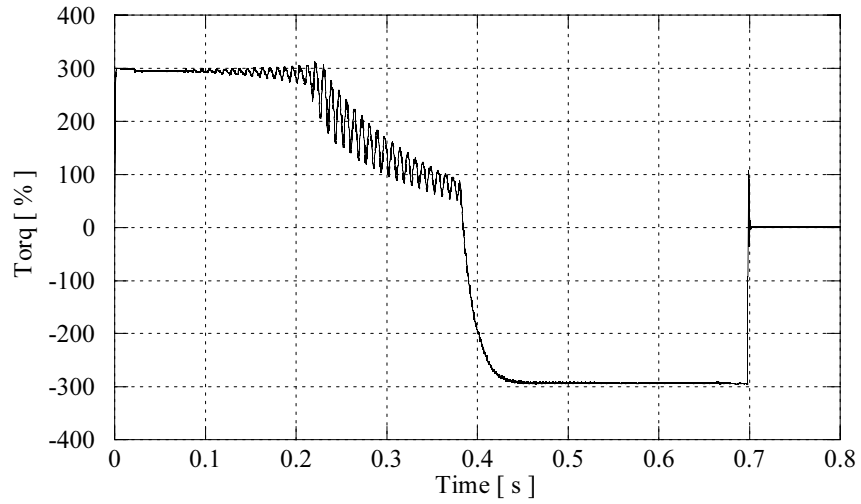


(f) Currents

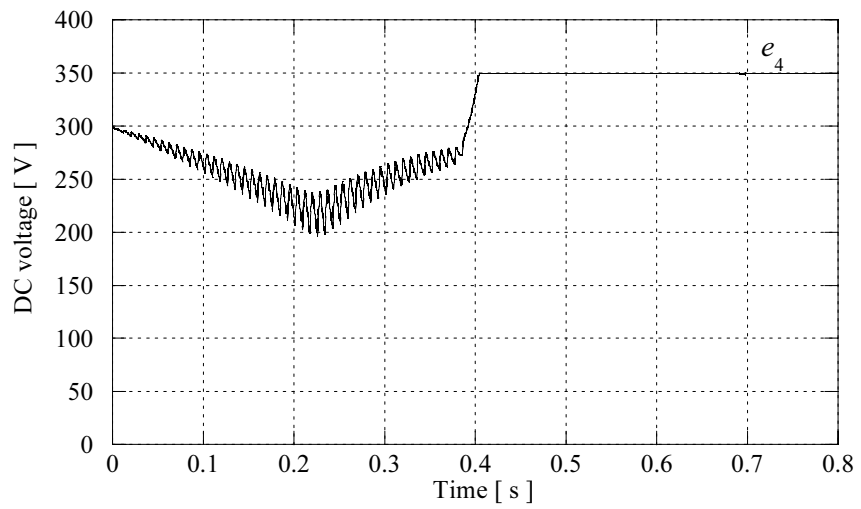
図5 提案回路シミュレーション結果  
Fig.5 Simulation results by boost motor driver with ELDC



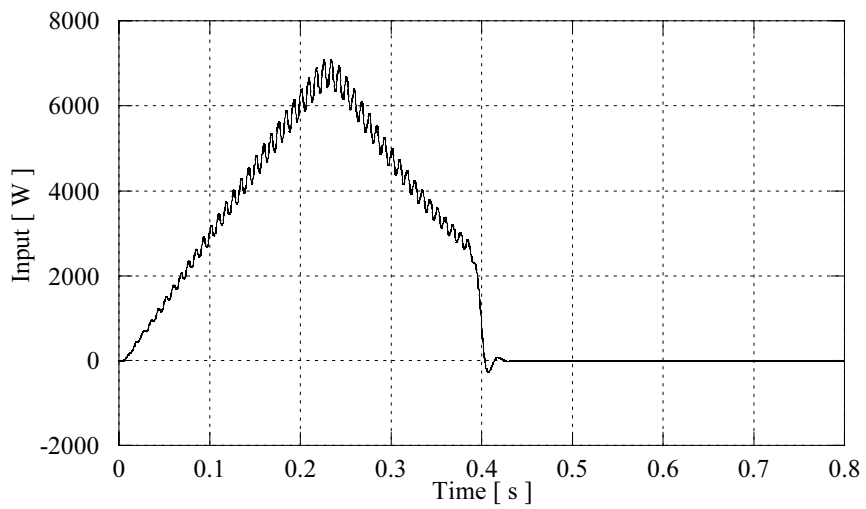
(a) Motor speed



(b) Motor torque

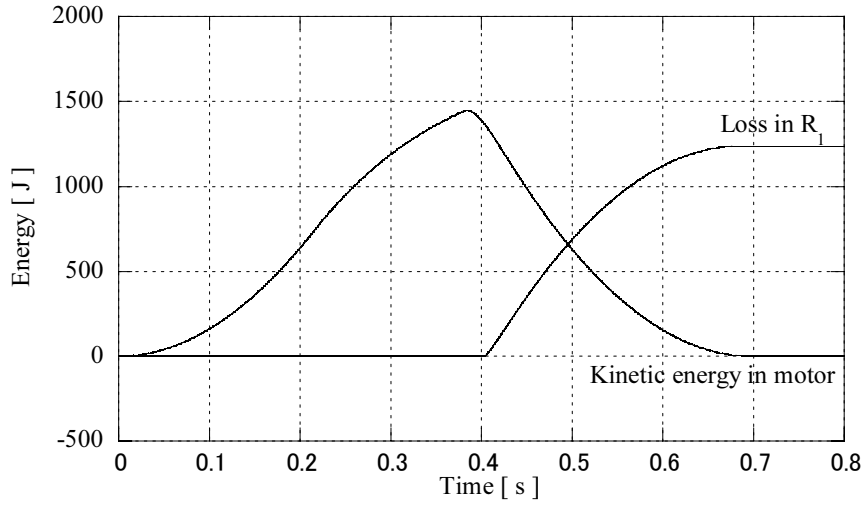


(c) DC voltage

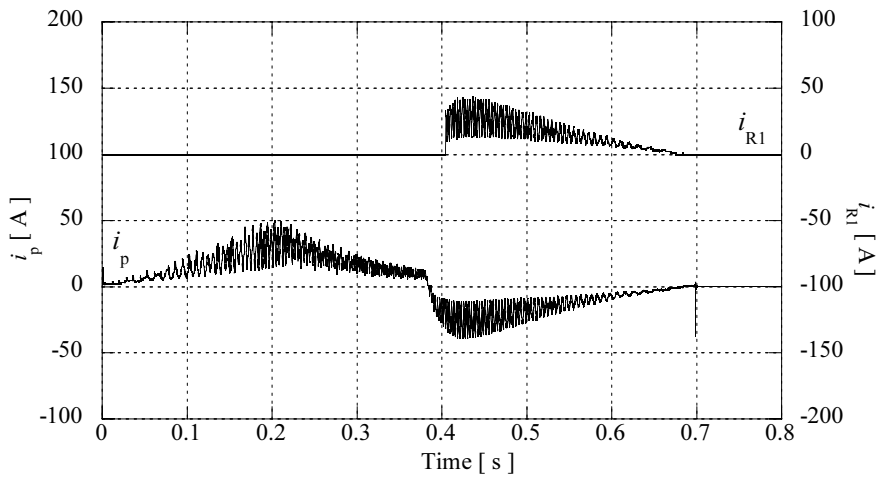


(d) Input power





(e) Loss and charged energies



(f) Currents

図6 単相倍電圧回路シミュレーション結果

Fig.6 Simulation results by single-phase voltage-double motor driver