

昇圧機能を付加した複数台直流モータの時分割四象限運転法

川村 卓也* 野口 季彦 (静岡大学)

Time Sharing Four-Quadrant Operation of DC Motors with Boost Chopper
Takuya Kawamura*, Toshihiko Noguchi, (Shizuoka University)

This paper presents a newly designed chopper circuit and its operation characteristics, which can drive multiple DC motors at the same time on the basis of a time sharing operation. By employing this method, the switching device count of the chopper can be reduced as more DC motors are used. The operation characteristics of the proposed circuit are examined through some experimental tests as well as computer simulations. As a result, it is clarified that the proposed technique achieves an independent and simultaneous drive of the multiple DC motors.

キーワード：チョップパ, 直流モータ, 四象限運転, 時分割制御
(Keywords: chopper, DC motor, four-quadrant operation, time sharing control)

1. はじめに

現在、モータの制御技術の発展に伴い、移動機器の電動化が急速に進んでいる。中でも電動車椅子に代表される障害者や高齢者を対象とした電動移動機器は急速に普及し、障害者や高齢者の社会的自立を促している。このような電動移動機器はその応用範囲も急速に拡大しており、今後も福祉機具産業の高度化を推進する質の高い移動機器に大きな期待が寄せられている。それらの移動機器が高度な動作を実現するには複数台のモータが必要になる。しかし、実装するモータが多くなるとそれぞれのモータを独立に駆動する回路が必要となるため、大型化や制御装置全体の機構の複雑化、高コスト化を避けることができない。

そこで、本稿では同時に複数台の直流モータを独立して駆動できる新たなチョップパとその制御法を提案する。提案する回路は複数台の直流モータを独立して四象限運転することが可能であり、従来法よりもスイッチング素子数を大幅に低減することが可能である。ここでは、時分割制御に基づく新しいチョップパを提案し、さらに昇圧機能を付加することによって従来法と同じ電源電圧で駆動することが可能となる新しい回路構成を提案する。この昇圧機能を付加した複数台直流モータの時分割四象限制御システムについて、シミュレーションと実験により種々の運転特性を確認したので報告する。

2. 回路構成

従来の四象限 H ブリッジチョップパを図 1 に示す。従来法では電動車椅子のように 2 台の直流モータを四象限運転す

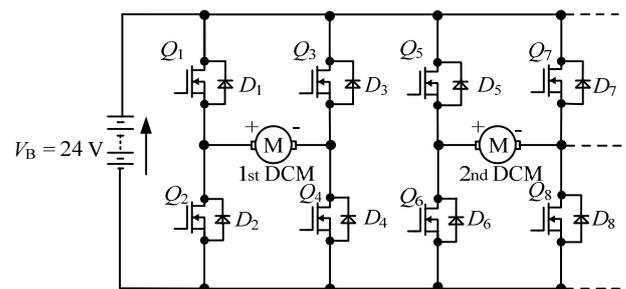


図 1 従来の四象限 H ブリッジチョップパ
Fig. 1. Conventional four-quadrant H-bridge chopper for DC motors.

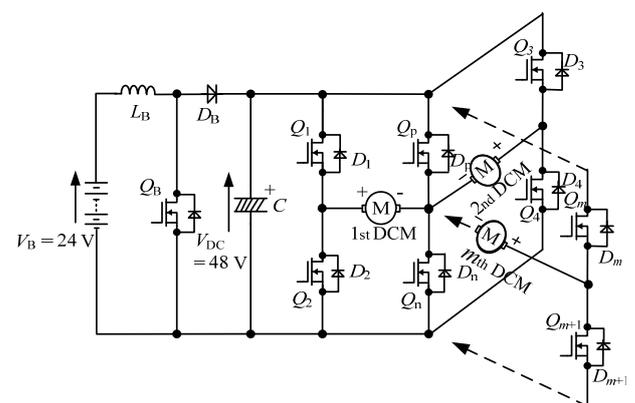


図 2 時分割四象限チョップパ
Fig. 2. Time sharing four-quadrant chopper for DC motors.

るためには 8 個のスイッチング素子を必要とする。そこで、スイッチング素子数を低減し、より多くの直流モータにも対応できる拡張性をもった回路とするために、図 2 に示し

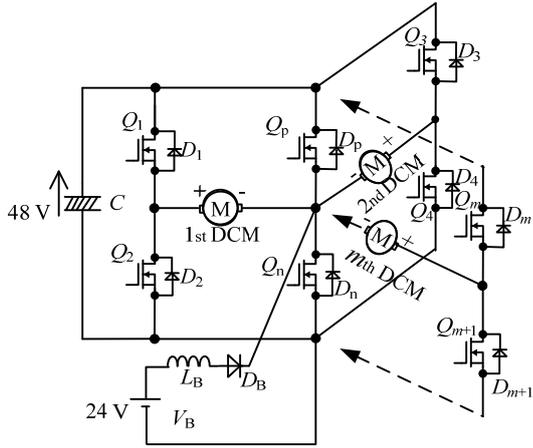


図3 提案する昇圧機能を付加した時分割四象限チョップパ
Fig. 3. Proposed time sharing four-quadrant chopper for DC motors incorporating voltage boost function.

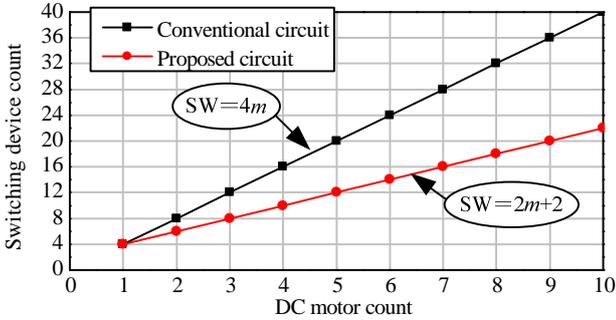


図4 スイッチングデバイス数の比較
Fig. 4. Comparison of switching device count.

たような時分割四象限チョップパを提案する。時分割四象限チョップパ回路では、それぞれの H ブリッジチョップパの一方のレグを共通としている。Qp, Qn により構成される共通レグは常に 1 kHz, 50 %デューティーサイクルでオンオフを繰り返す。そして、外側の Q1, Q2, Q3, Q4 など構成されるレグは共通レグの 10 倍の周波数である 10 kHz で動作させてモータの速度制御を行う。共通レグを 2 台のモータに対して時分割で動作させることにより、それぞれの直流モータを独立して四象限運転させることが可能となる。更に、同図のように共通レグにモータを接続し、外側のレグにスイッチを 2 つ加えることでより多くのモータを独立駆動することができる。直流モータの台数を増やすと共通レグの電流量は増大するが、そのスイッチング周波数とデューティーサイクルは 1 kHz, 50 %のままで良いため、電流定格が大きな素子を余裕をもって使うことができる。また、外側レグのスイッチング周波数は 10 kHz のままで任意のデューティーサイクルとすることができる。しかし、共通レグは常に 50 %デューティーサイクルで動作しているので、電源の電圧利用率は半分になる。そのため、従来の 2 倍に相当する電圧を直流電源として使用するか、図 2 のように倍電圧昇圧回路を挿入する必要がある。そこで、図 3 に本稿で提案する昇圧機能を付加した時分割四象限チョッ

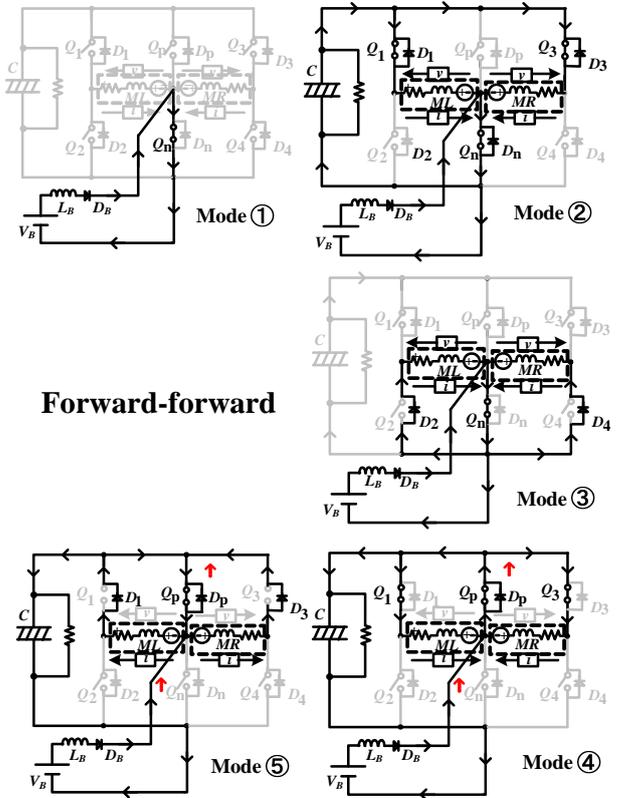
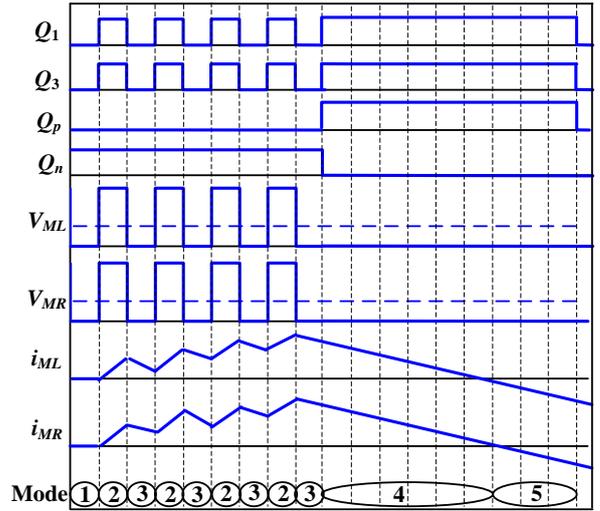


図5 正転ー正転動作時のスイッチング波形と電流経路
Fig. 5. Operation waveforms and current paths in forward-forward operation.

パを示す。Qp, Qn で構成する共通レグは常に 1 kHz, 50 %デューティーサイクルで動作しているので、共通レグに電圧源 V_B とインダクタ L_B を接続することで、キャパシタ C の電圧は電圧源の倍に昇圧することができる。これにより従来法と同様の電源を使用したままスイッチング素子数を増やすことなく時分割四象限運転が可能となる。図 4 に示すように、従来は m 台の直流モータを駆動するのに 4m 個のスイッチング素子が必要であったが、提案法では、2m+2 個のスイッチング素子で m 台の直流モータを独立に四象

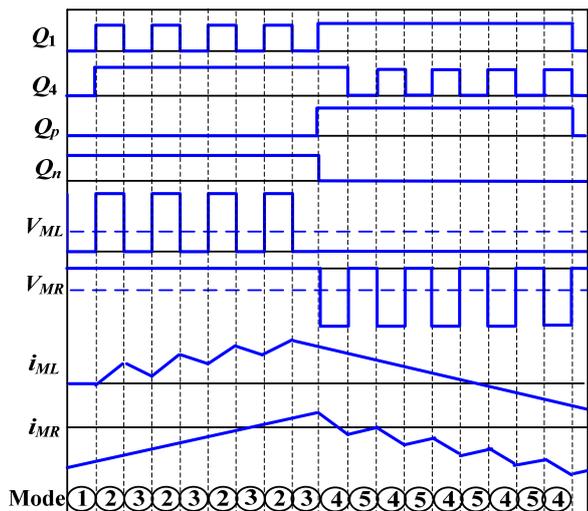


図 6 正転-逆転動作時のスイッチング波形と電流経路

Fig. 6. Operation waveforms and current paths in forward-backward operation.

限運転することが可能となる。例えば、四輪駆動の電動移動機器の場合は、従来法から 6 個のスイッチング素子を削減でき、回路の簡素化、省スペース化、低コスト化を図ることができる。

3. 動作原理

図 5～図 7 に 2 個のモータを駆動する場合の動作波形と電流経路を示す。Qp, Qn は共通レグのスイッチング波形で、1 kHz, 50 %デューティサイクルで動作している。Q1～

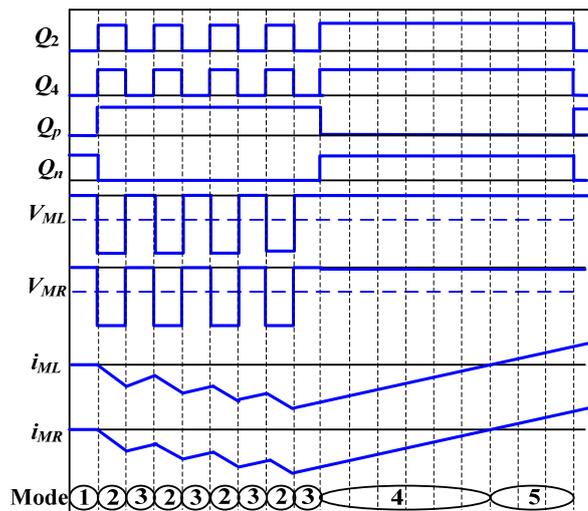


図 7 逆転-逆転動作時のスイッチング波形と電流経路

Fig. 7. Operation waveforms and current paths in backward-backward operation.

Q4 は外側のレグのスイッチング波形で、それぞれ 10 kHz, 50 %デューティサイクルで動作している場合を例示している。

〈3・1〉 正転-正転動作 図 5 に正転-正転動作時のスイッチング波形と動作モードを示す。Mode①では、共通レグの下側スイッチのみがオンし、インダクタ L_B にエネルギーを蓄える。Qn がオンの区間では、Q1 と Q3 がオンになると Mode②に示すようにそれぞれのモータに電圧が印加され、同時に図のような経路で電流が流れる。Q1, Q3

がオフされると Mode③となり下側スイッチの D2, D4 がオンとなり還流する。この Qn がオンの区間では同時に昇圧チョップのインダクタ L_B にエネルギーを蓄えており、共通レグのスイッチが Qn から Qp に切り換わると L_B に蓄えられていたエネルギーはキャパシタ C に転送されて昇圧動作が実現する。Qp がオンの区間でもモータの電流は流れ続けているので、モータ電流が還流する経路を作る必要があり、Mode④のように上側スイッチの Q1, Q3 をオンし続けることによって還流させることができる。そして、電圧が印加されていない区間ではモータの誘起電圧の影響により電流が逆向きに流れる状態も存在する。その場合は Mode⑤に示す経路で還流する。Mode⑤の後には Mode②に戻り、Mode②～Mode⑤が繰り返される。

〈3・2〉 正転－逆転動作 図 6 に正転－逆転動作時のスイッチング波形と動作モードを示す。Mode①では、共通レグの下側スイッチ Qn のみをオンし、キャパシタ C の充電に備える。Mode②では Q1 をオンし、モータ ML には正方向に電圧が印加され図のように電流が流れる。モータ MR は Q4 をオンすることによってモータの電流を還流させる。続いて Mode③では Q1 はオフになるので、モータ ML に流れる電流は下側のダイオード D2 を通り還流する。共通レグのスイッチ Qn がオンの区間は昇圧チョップのインダクタ L_B にエネルギーを蓄えている。Mode④になり、スイッチが Qp に切り換わると L_B に蓄えられていたエネルギーはキャパシタ C に転送され、倍電圧に昇圧される。Qp がオンの区間で Q4 をオンすると、モータ MR には負方向の電圧が印加され、電流も負方向に流れる。モータ ML は Q1 をオンすることによって正の電流は Q1 と Qp を通って還流する。また、Mode⑤になるとモータ RM に流れる電流は上側スイッチのダイオード D3 を通り還流する。Mode⑤の後 Mode②に戻り、Mode②～Mode⑤が繰り返される。

〈3・3〉 逆転－逆転動作 図 7 に逆転－逆転動作時のスイッチング波形と動作モードを示す。Mode①では共通レグの下側スイッチの Qn のみをオンし昇圧チョップのインダクタ L_B にエネルギーを蓄える。Mode②で、Qn から Qp にスイッチが切り換わり、L_B に蓄えられていたエネルギーによってキャパシタ C を充電する。同時に外側スイッチの Q2, Q4 をオンすることでモータに負方向の電圧が印加され、逆向きに電流が流れる。Mode③では上側スイッチのダイオード D1, D3 を通り還流する。Mode④になり共通レグが Qp から Qn に切り換わると同時に Q2, Q4 をオンし続けることによって、図のようにモータ電流を還流させることができる。そして、電圧が印加されていない区間でモータの誘起電圧の影響により電流が逆向きに流れる状態が存在する場合は Mode⑤に示す経路で還流する。Mode⑤の後 Mode②に戻り、Mode②～Mode⑤が繰り返される。

共通レグを 2 つのモータに対し時分割で利用することによって、モータ ML には正方向に電圧を印加できると同時に、モータ MR には負方向に電圧を印加することが可能となる。これにより正転－逆転動作を実現することができる。

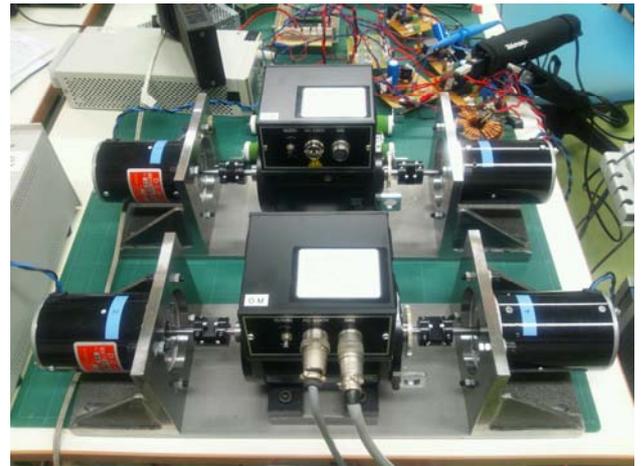


図 8 実験に使用したモータ

Fig. 8. Test motors of experimental setup.

表 1 主回路の電気的パラメータ

Table 1. Electric parameters of power circuit.

Power supply voltage	24 V
Switching frequency (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4)	10 kHz
Switching frequency (Q_p, Q_n)	1 kHz
Capacitor C	4000 μ F
Inductor L _B	50 mH

表 2 実験に使用したモータの仕様

Table 2. Specifications of ML and MR.

Rated voltage	24 V
Rated current	5.3 A
Rated power	90 W
Rated speed	2750 r/min
Rated torque	0.32 Nm

表 3 モータの回転方向と速度指令条件

Table 3. Rotational direction and operation duty cycle of motors.

	Motors rotation (ML - MR)	Switching duty cycle (ML - MR)	figure No.
Simulation no load	forward - forward	80 % - 50 %	9
	forward - backward	80 % - 50 %	10
	backward - backward	80 % - 50 %	11
Experimental ① no load	forward - forward	80 % - 50 %	9
	forward - backward	80 % - 50 %	10
	backward - backward	80 % - 50 %	11
Experimental ② 100 % torque	forward - forward	80 % - 50 %	12
	forward - backward	80 % - 50 %	13
	backward - backward	80 % - 50 %	14

以上のような動作により、モータ台数が増えてもそれぞれのモータは同時に独立して別々の回転方向へ駆動することが可能となる。

4. シミュレーションと実験結果

〈4・1〉 無負荷でのシミュレーションと実験 表 1 に示す電気的パラメータをもつ主回路についてシミュレーションと実験を行った。ここでは 2 台の直流モータを運転する回路を試作し、表 2 に示した仕様をもつ直流モータを供試機として、それぞれを ML, MR とよぶ。図 8 に示すように、

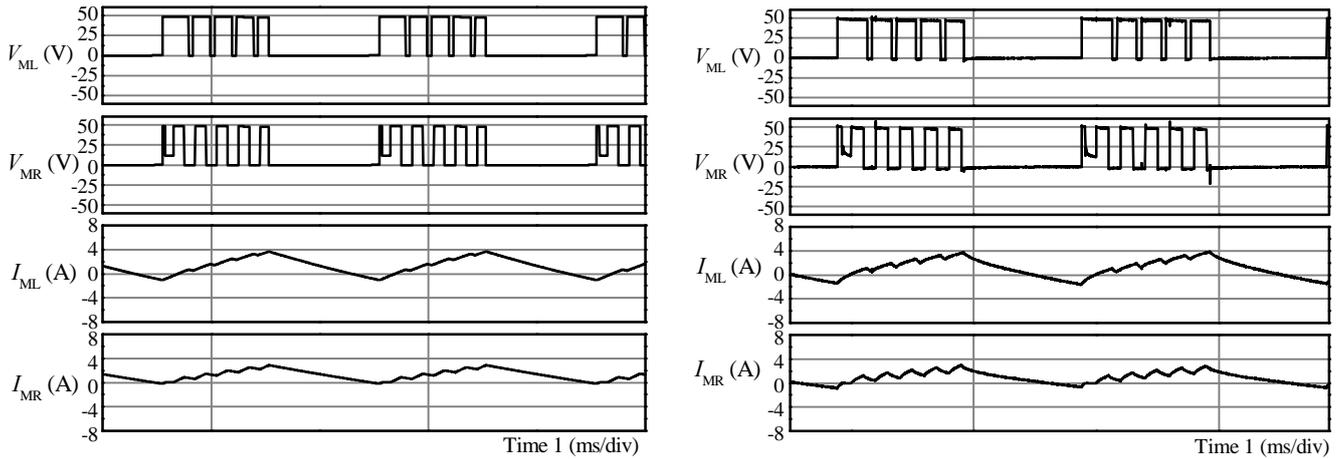


図9 正転 (80%) -正転 (50%) 無負荷時のシミュレーション (左図) と実験波形 (右図)

Fig. 9. Simulation (left) and experimental (right) waveforms in forward (80%) -forward (50%) no load operation.

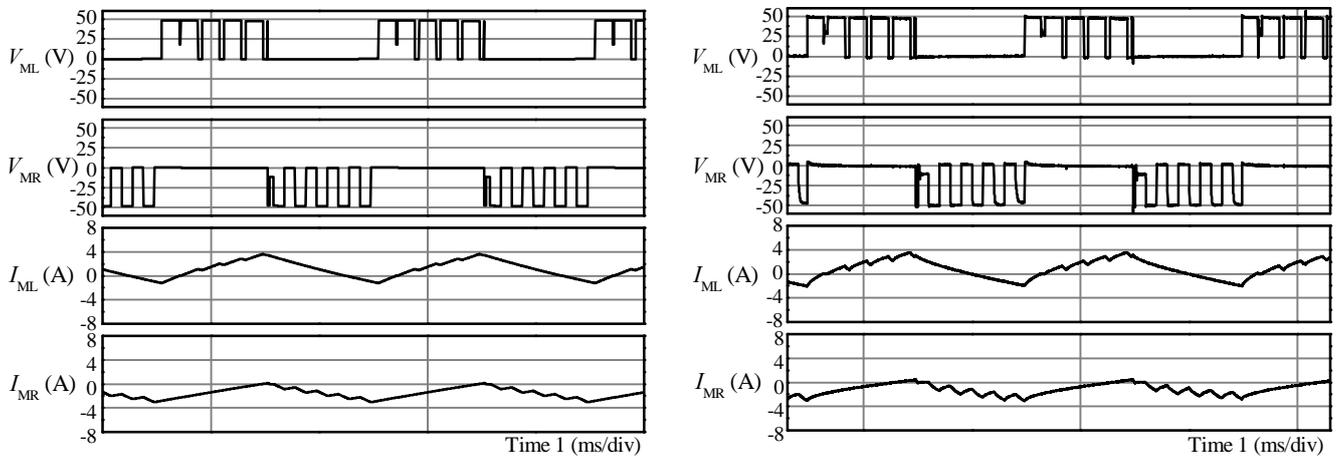


図10 正転 (80%) -逆転 (50%) 無負荷時のシミュレーション (左図) と実験波形 (右図)

Fig. 10. Simulation (left) and experimental (right) waveforms in forward (80%) -backward (50%) no load operation.

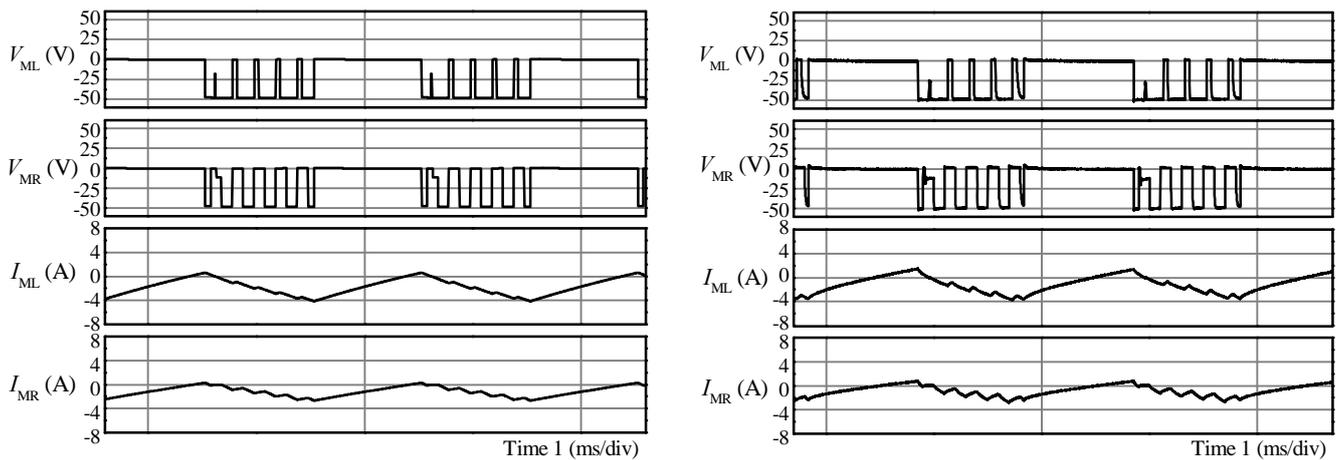


図11 逆転 (80%) -逆転 (50%) 無負荷時のシミュレーション (左図) と実験波形 (右図)

Fig. 11. Simulation (left) and experimental (right) waveforms in backward (80%) -backward (50%) no load operation.

供試モータ 2 台それぞれに負荷モータを接続し、無負荷試験と実負荷試験を行った。表 3 に示すようにモータの回転方向と速度指令 (デューティサイクル) を決めて、シミュレーションと実験を行った。図 9~図 11 に無負荷時のシミュレーションと実験結果の各部動作波形を示す。また、

共通レグの Q_p , Q_n は常に 1 kHz, 50%デューティサイクルで動作させており、2 台のモータは同時に動作させている状態とした。表 3 に示すように図 9 では、 Q_1 と Q_3 をそれぞれ 80%と 50%デューティサイクルでオンオフさせると、 Q_n がオンの区間で ML と MR にそれぞれ 80%と

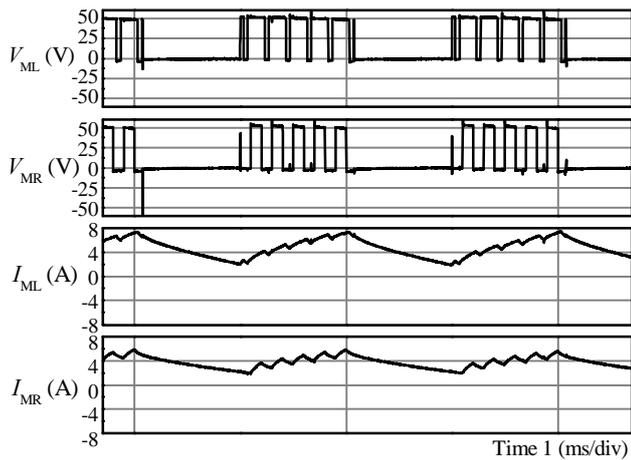


図 12 正転 (80%) - 正転 (50%) 負荷時の実験波形
 Fig. 12. Experimental waveforms in forward (80%)
 -forward (50%) full load operation.

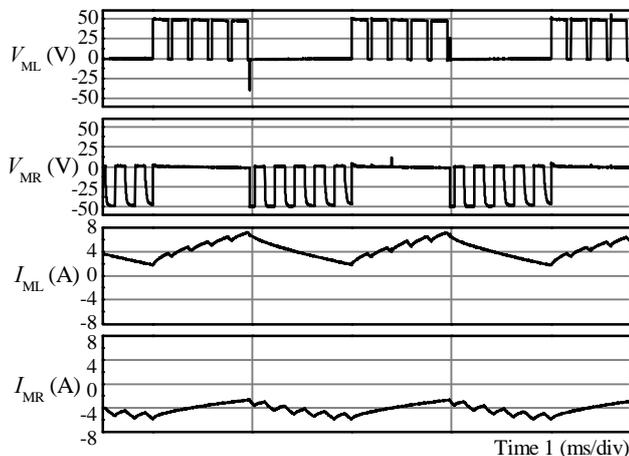


図 13 正転 (80%) - 逆転 (50%) 負荷時の実験波形
 Fig. 13. Experimental waveforms in forward (80%)
 -backward (50%) full load operation.

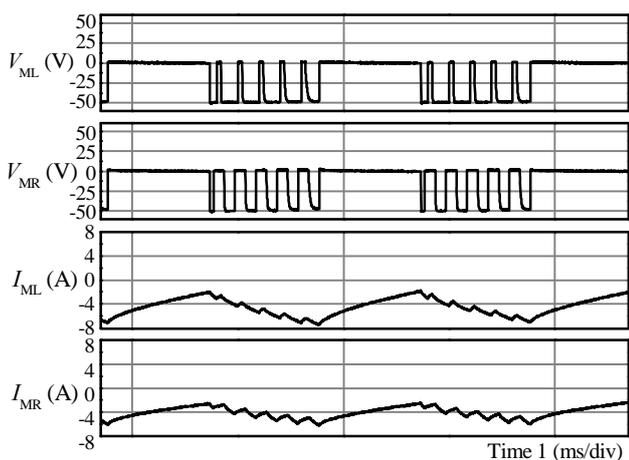


図 14 逆転 (80%) - 逆転 (50%) 負荷時の実験波形
 Fig. 14. Experimental waveforms in backward (80%)
 -backward (50%) full load operation.

50%のデューティサイクルで制御された正の電圧パルスが印加される。共通レグは1 kHzで動作しているので平均電圧としてMLには約19.2 V, MRには約12 Vの電圧が印

加され、それに応じて電流も正方向に流れる。図10と図11も同様に表3に示した速度指令で無負荷運転した場合の波形である。これらの図からもシミュレーションとよく一致した実験波形が得られていることがわかる。また、いずれの場合も印加されている電圧パルスの波高値は48 Vであるため、同時に良好な昇圧動作も行われていることが確認できる。このとき、キャパシタCの電圧を48 Vに保とうとすると、負荷率によっては共通レグのスイッチングデューティサイクルが数%変動するが、モータに印加する電圧は外側レグのスイッチング素子で制御することができるので問題ない。

〈4・2〉 実負荷での実験 図12～図14にモータの定格トルク100%負荷を接続し、表3に示すモータの回転方向と速度指令(デューティサイクル)を用いた実負荷試験の各部動作波形を示す。モータMLとMRをデューティサイクル80%～50%で回転数を一定にして動作させた場合、モータの回転方向を正転-正転, 正転-逆転, 逆転-逆転のいずれの状態でも、無負荷時と比べてトルクを出したい方向に十分に電流を流せることが確認できた。そして、無負荷時には電圧を印加していない区間にモータの誘起電圧の影響で逆方向に電流が流れる状態が存在していたが、負荷時には電流が逆方向に流れる状態が存在しなくなるので、電流平均値が従来のチョッパと比肩できる値となり十分にトルクを出力できることが確認された。

5. まとめ

本稿では、共通レグを設けた時分割制御に基づく新しいチョッパ回路を提案した。この回路では $2m+2$ 個のスイッチング素子で m 台の直流モータを独立に運転することができるため、モータ台数が増えるほど従来回路と比べ素子数を大幅に削減できる。さらに、昇圧機能を付加することによって従来チョッパと同じ電圧源を使用して、新たにスイッチング素子を付加することなくモータを四象限運転することもシミュレーションと実験によって確認した。ここで提案した手法は、今後ますます普及が期待される電動移動機器の簡素化と低コスト化だけでなく、多数のモータ駆動によるモーション制御の高度化にも寄与すると思われる。

文 献

- (1) 土山・手島・鈴木・大路・作井:「高齢者向け屋内移動機器の開発」, 平成17年電気学会産業応用部門大会, Vol.2, 58, p.p.325-326 (2005)
- (2) C. Anyapo, K. Saito, and T. Noguchi, "Development of Electric Wheelchair Using Fuel Cell", Niigata Branch of IEEJ, IV-6, p. 56, 2006.
- (3) K. Saito, C. Anyapo, P. Kamjitjam and T. Noguchi: "Development of an Electric Wheelchair System Using PEM Fuel Cell," Journal of Asian Electric Vehicles, Vol. 7, No. 1, pp.1185-1190, 2009.
- (4) C. Anyapo, K. Saito and T. Noguchi: "Four-Quadrant Operation of Two DC Motors with Three-Leg Full-Bridge Chopper Incorporated Voltage Boost Function," The 2009 Annual Meeting I.E.E. Japan, pp.42-43, 2009
- (5) 川村・野口:「複数台直流モータの時分割四象限運転法」, 平成23年電気学会産業応用部門大会, 1-60 (2011)
- (6) 川村・野口:「昇圧機能を付加した時分割チョッパ」, 電気関係学会東海支部連合大会, K1-7 (2011)