

インダクタモジュールマルチレベル電流形インバータ 新規トポロジーの提案

岩田 陽祐 野口 季彦 Tran Thi Lam Quyen (静岡大学)

Novel Topology of Multilevel Current-Source Inverter Using Inductor Modules

Yosuke Iwata, Toshihiko Noguchi, Tran Thi Lam Quyen (Shizuoka University)

This paper proposes a novel inductor module based power converter topology applicable to multilevel current-source inverters (CSIs). Component counts of the proposed and the conventional circuit topologies are compared, where the proposed circuit allows significant reduction of the component counts. Several simulation results show that the proposed circuit can properly generate five-level and/or seven-level current waveforms with a simple circuit operation.

キーワード：電流形インバータ，インダクタモジュール，マルチレベル，トポロジー

Keywords : current-source inverter, inductor module, multilevel, topology

1. まえがき

電流形インバータ (CSI) は、電流フィードバックなしで出力電流を制御することが可能であり、また、本質的に短絡保護が不要であるといった電圧形インバータにないメリットがある。しかし、トランジスタにダイオードを直列接続することや常に電流を流す必要があるため、導通損失の観点から構成部品点数がより少ない回路トポロジーが求められる。一方、インバータのマルチレベル化は、 dv/dt , di/dt を小さくでき、電磁放射ノイズの低減と同時に出力高調波を効果的に改善できる。これまで CSI をマルチレベル化する手法は幾つか提案されている⁽¹⁾⁽²⁾。例えば図 1 の並列 H ブリッジ CSI や図 2 のマルチセル CSI が挙げられる。しかし、これらの従来回路はレベル数を増やすごとに、直流電流源やインダクタ、スイッチング素子が増加し、多くの構成部品が必要となる。

本稿では H ブリッジ方式を基本としてインダクタモジュール

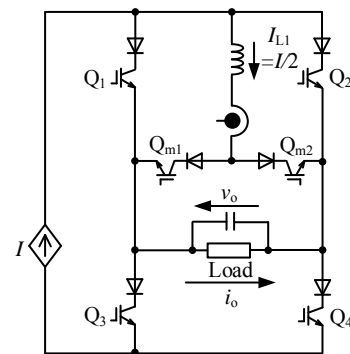


図 3 提案する 5 レベルインダクタモジュール CSI
Fig. 3. Proposed 5-level CSI with inductor module.

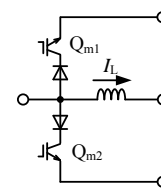


図 4 インダクタモジュール
Fig. 4. Inductor module.

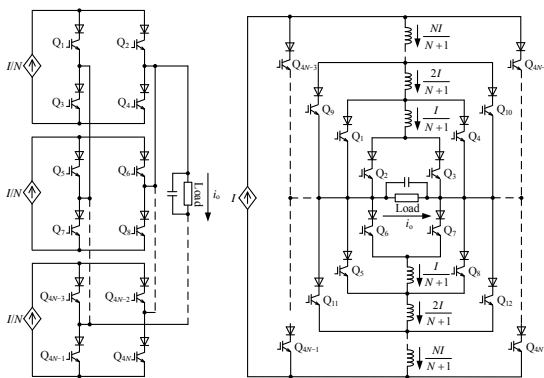


図 1 並列 H ブリッジ CSI
Fig. 1. Parallel H-bridge CSI.

図 2 マルチセル CSI
Fig. 2. Multicell CSI.

表 1 5 レベルインダクタモジュール CSI のスイッチング状態
Table 1 Switching states of 5-level inductor module based CSI.

Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q _{m1}	Q _{m2}	<i>i_o</i>	Operation mode of inductor-module
1	0	0	1	1	0	+I	Holding mode
1	0	0	1	0	1	+I/2	Charging mode
0	1	0	1	1	0	+I/2	Discharging mode
0	1	0	1	0	1	0	Holding mode
1	0	1	0	1	0	0	Holding mode
0	1	1	0	1	0	-I/2	Charging mode
1	0	1	0	0	1	-I/2	Discharging mode
0	1	1	0	0	1	-I	Holding mode

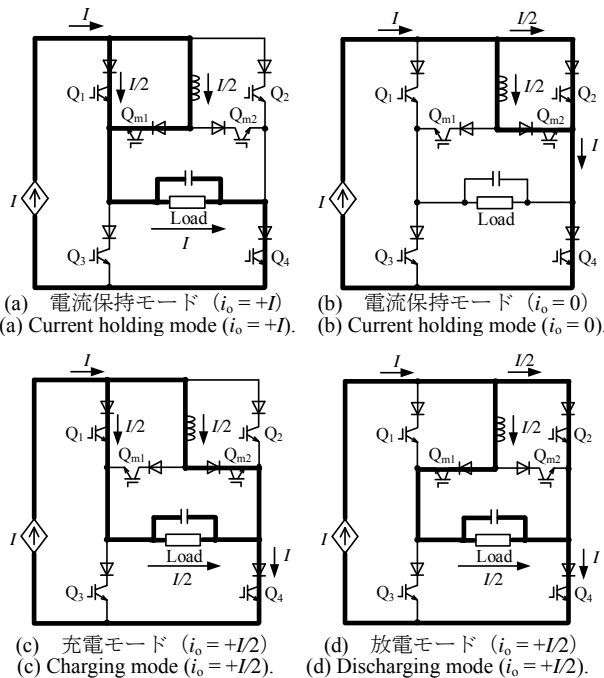


図 5 インダクタモジュール CSI の動作モード
 Fig. 5. Operation modes of inductor module based CSI.

ールを使用した新たな回路方式を提案する。従来回路と提案回路の部品点数を比較し、5 レベルおよび 7 レベル電流を出力する場合についてシミュレーションで動作検証を行い、提案する回路構成と動作原理の妥当性を確認したので報告する。

2. 回路構成と動作原理

<2.1> 5 レベルインダクタモジュール CSI

図 3 に 5 レベルの場合の提案回路を示す。この回路は Hブリッジ CSI にインダクタモジュールを組み合わせたものである。インダクタモジュールとは図 4 に示すとおり、トランジスタ、ダイオード、インダクタだけで構成された回路を指す。提案回路のスイッチング状態を表 1 に示す。5 レベル電流を出力するため、負荷に供給される出力電流は、 $i_o = +I, +I/2, 0, -I/2, -I$ の 5 種類である。このときスイッチング状態の冗長性を利用して、インダクタモジュールの充電と放電モードを切り換えることでインダクタ電流を一定に保ちつつ 5 レベル電流を出力する。インダクタモジュール CSI の動作モードを図 5 に示す。(a)の電流保持モードではインダクタは短絡されるのでインダクタ電流は保持され、最大レベル $i_o = +I$ を出力する。(b)の電流保持モードにおいても同様に、インダクタは短絡されるのでインダクタ電流は保持され、ゼロレベル $i_o = 0$ を出力する。(c)の充電モードでは負荷とインダクタが並列接続されており、インダクタは直接電流源からエネルギーを供給される。(d)の放電モードでは電流源が短絡されるので、インダクタはエネルギーを放出する。電源電流の 1/2 に相当する中間レベル $i_o = +I/2$ を出力する際、これら 4 つの動作モードのうち(c)の充電モードと(d)の放電モードを交互に切り換えることによ

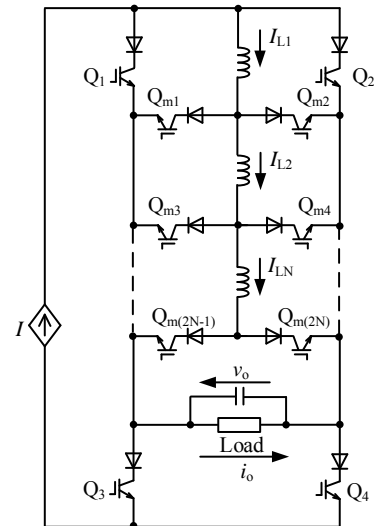


図 6 一般化した提案回路

Fig. 6. Generalized multilevel inductor module based CSI.

表 2 部品点数の比較
 Table 2. Comparison of component counts.

Circuit configuration	Parallel H-bridge CSI	Multicell CSI	Proposed inductor module CSI
transistor	$2(M-1)$	$2(M-1)$	$M+1$
Diode	$2(M-1)$	$2(M-1)$	$M+1$
Inductor	0	$M-3$	$(M-3)/2$
Gate drive Power supply	$(M+3)/2$	$(M+3)/2$	3
DC current source	$(M-1)/2$	1	1

て、インダクタモジュール電流を $I/2$ に制御することができる。

<2.2> 提案回路の一般化

一般化した提案回路を図 6 に示す。インダクタモジュールの数を N 、出力電流のレベル数を M とおくと、次の関係が成り立つ。

$$M = 2N + 3 \tag{1}$$

また、 k 番目のインダクタモジュールの電流を I_{Lk} とおくと、次の漸化式で一般化することができる。

$$I_{L(k+1)} = I_{L(k)} - \frac{I}{N+1} \quad k=1, 2, \dots, N \quad I_{L1} = \frac{N}{N+1} I \tag{2}$$

従来回路と提案回路の部品点数を数え上げた結果を表 2 に示す。ただし、出力電流のレベル数 M を用いて表した。提案回路は最も少ない部品点数でマルチレベル電流波形を出力できることがわかる。また、出力レベル数を増やしても、ゲートドライブ電源の個数が 3 個で一定であることは提案回路の特長であり、多レベル化するほど有利である。出力レベル数と部品点数の関係を図 7~9 に示す。いずれの場合も出力レベル数の増加にともない部品点数は増えるが、提案回路は最も少ない増加量であることがわかる。ただし、図 8 において並列 Hブリッジ CSI のインダクタ数が一定で零である理由は、電源として理想電流源を想定しているからである。電流源を降圧チョップ等で実現した場合、必要なインダクタの増加量は提案回路と同じである。

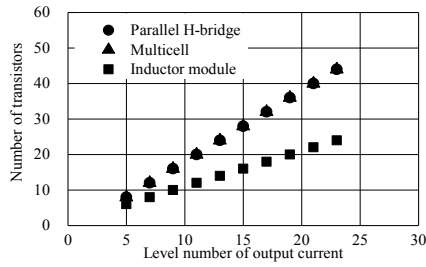


図 7 出力レベル数—トランジスタ数
Fig. 7. Numbers of output levels and transistors.

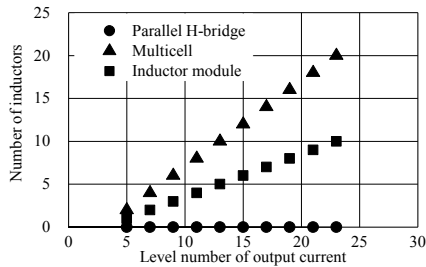


図 8 出力レベル数—インダクタ数
Fig. 8. Numbers of output levels and inductors.

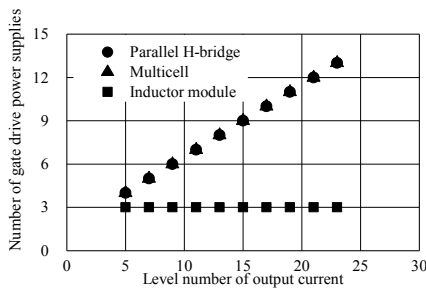


図 9 出力レベル数—ゲートドライブ電源数
Fig. 9. Numbers of output levels and gate drive power supplies.

3. シミュレーションによる動作検証

<3.1> 5 レベル出力時のシミュレーション結果

図 10 に 5 レベル出力の場合の制御ブロック図を示す。オフセットの異なる 4 つの三角波キャリアと正弦波指令値を比較して PWM 信号を生成する。インダクタモジュールの電流制御はヒステリシス付きリレー制御とする。指令値 I_{Lref} とフィードバック値 I_{L1} の偏差を量子化し、量子化した極性信号が 1 ならば充電モード、0 ならば放電モードの冗長なスイッチング状態を選択する。このとき、インダクタモジュール電流が一定に保たれることによって、負荷に中間レベル $i_o = +I/2$ を供給することができる。

シミュレーションの条件は電源を理想電流源とし $I = 6\text{ A}$ 、三角波比較法により PWM を行い、キャリア周波数と出力電流基本波周波数はそれぞれ 5 kHz 、 50 Hz とし、インダクタモジュールのインダクタンスは 1.8 mH とした。また、インダクタモジュールの平均スイッチング周波数をキャリア周波数と一致させるために、ヒステリシス幅は 1.2 A とした。負荷は抵抗のみで $7\ \Omega$ とし、 $15\ \mu\text{F}$ のフィルタキャパシタを並列接続している。図 11 にシミュレーション結果を示す。

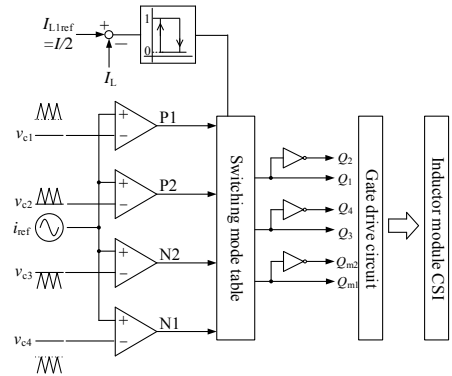


図 10 5 レベル提案回路の制御ブロック図
Fig. 10. Control block diagram of proposed 5-level circuit.

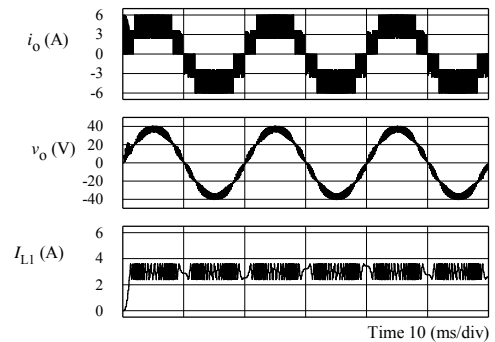


図 11 5 レベル提案回路のシミュレーション波形
Fig. 11. Simulation waveforms of proposed 5-level circuit.

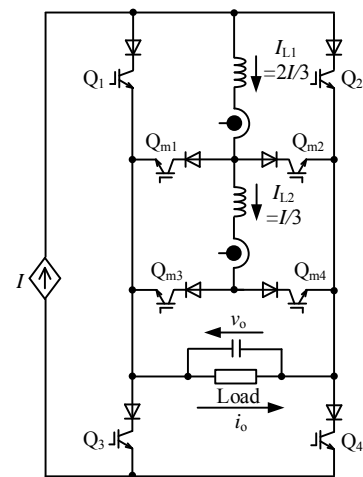


図 12 提案する 7 レベルインダクタモジュール CSI
Fig. 12. Proposed 7-level CSI with inductor module.

上から出力電流 i_o 、負荷電圧 v_o 、インダクタ電流 I_{L1} を表している。提案回路は、5 レベルの電流波形を適切に出力していることがわかる。また、負荷電圧はフィルタキャパシタによって歪の少ない正弦波となっており、同時に I_{L1} は 2 A を保つように制御できている。

<3.2> 7 レベル出力時のシミュレーション結果

提案回路を図 12 に示す。7 レベル出力の場合、主インバータである H ブリッジインバータに 2 個のインダクタモジ

表 3 7レベルインダクタモジュール CSI のスイッチング状態

Table 3. Switching states of 7-level inductor module based CSI.

Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q _{m1}	Q _{m2}	Q _{m3}	Q _{m4}	output current	L ₁	L ₂
1	0	0	1	1	0	1	0	+I	hold	hold
0	1	0	1	1	0	1	0	+2I/3	dis charge	hold
1	0	0	1	0	1	1	0	+2I/3	charge	dis charge
1	0	0	1	1	0	0	1	+2I/3	hold	charge
0	1	0	1	0	1	1	0	+I/3	hold	dis charge
0	1	0	1	1	0	0	1	+I/3	dis charge	charge
1	0	0	1	0	1	0	1	+I/3	charge	hold
0	1	0	1	0	1	0	1	0	hold	hold
1	0	1	0	1	0	1	0	0	hold	hold
0	1	1	0	1	0	1	0	-I/3	charge	hold
1	0	1	0	0	1	1	0	-I/3	dis charge	charge
1	0	1	0	1	0	0	1	-I/3	hold	dis charge
0	1	1	0	0	1	1	0	-2I/3	hold	charge
0	1	1	0	1	0	0	1	-2I/3	charge	dis charge
1	0	1	0	0	1	0	1	-2I/3	dis charge	hold
0	1	1	0	0	1	0	1	-I	hold	hold

ジュールを追加することによって実現する。スイッチング状態を表3に示す。5レベル出力時と異なり、2つのインダクタを流れる電流を同時に一定制御する必要がある。出力電流 $i_o = \pm I/3, \pm 2I/3$ を出力する際、2つのインダクタにはそれぞれ保持、放電、充電モードが存在し、この3つのモードを適宜切り換えることによって一定電流に保つ。図13は7レベル出力の制御ブロック図を示したものである。オフセットの異なる6つの三角波キャリアを用いて正弦波電流指令値にPWMを施す。2つのインダクタモジュール電流は、それぞれ指令値との偏差を量子化し、量子化した極性信号に応じたスイッチング状態を選択する。7レベル出力の場合、一方のインダクタを充放電制御すると、もう一方のインダクタは充電もしくは放電を続ける。したがって、片方のインダクタを優先的に制御し、もう一方の極性信号が変化した瞬間、他方のインダクタの充放電制御に切り換えるといった手法を適用する。インダクタ電流は先に述べた漸化式に基づき I_{L1} を $2I/3$ 、 I_{L2} を $I/3$ に一定制御する。シミュレーションでは、インダクタモジュールのインダクタを L_1, L_2 とともに 9 mH とした。また、インダクタモジュールの平均スイッチング周波数をキャリア周波数と一致させるために、ヒステリシス幅を I_{L1}, I_{L2} とともに 0.2 A とした。その他の条件は5レベル出力時と同じである。図14にシミュレーション結果を示す。出力電流 i_o として7レベルの電流波形が適切に出力されていることがわかる。また、負荷電圧 v_o はフィルタキャパシタが高次高調波を吸収するため正弦波状となる。また、インダクタモジュール電流 I_{L1}, I_{L2} はそれぞれ $4\text{ A}, 2\text{ A}$ を保つように制御できている。

4. まとめ

本稿では、インダクタモジュールを用いたマルチレベル

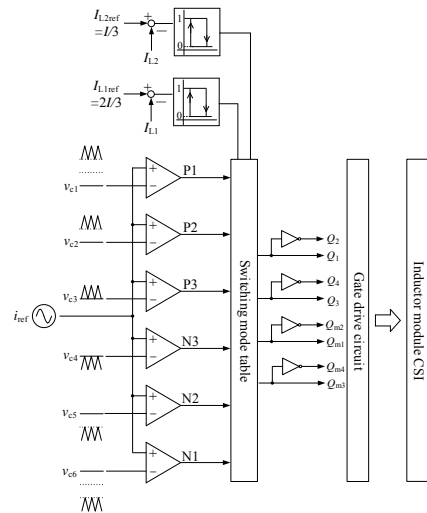


図 13 7レベル提案回路の制御ブロック図
Fig. 13. Control block diagram of proposed 7-level circuit.

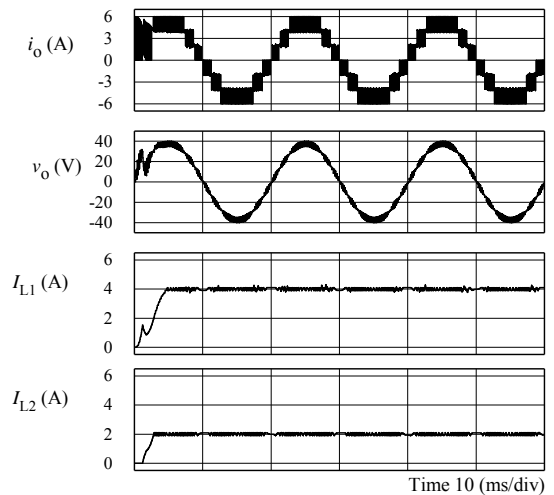


図 14 7レベル提案回路のシミュレーション波形
Fig. 14. Simulation waveforms of 7-level proposed circuit.

電流形インバータの新規トポロジーを提案し、5レベル出力の場合を例に、提案回路の動作原理を説明した。更に、レベル数を一般化した回路についても検討し、従来回路と部品点数の比較を行った。提案回路は最も少ない部品点数で構成できること、出力電流のレベル数を増やしてもゲートドライブ電源の個数は3個で一定であることがわかった。また、5レベルと7レベル出力時のシミュレーションを行い、提案回路の動作特性を確認した。

文 献

- (1) McGrath B.P., Holmes D.G.: "Natural Current Balancing of Multicell Current Source Converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, No. 3, pp. 1239-1246 (2008).
- (2) T. Noguchi, Suroso: "Review of Novel Multilevel Current-Source Inverters with H-Bridge and Common-Emitter Based Topologies", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Vol. 5, pp. 4006-4011 (2010).
- (3) 池上 憲・野口季彦:「インダクタモジュールを用いたマルチレベル電流形インバータの実機検証」, 平成 26 年電力技術・電力系統技術・半導体電力変換合同研究会