

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構成と動作原理

岩田 陽祐 野口 季彦 Tran Thi Lam Quyen (静岡大学)

Configuration and Operation Principle of Multilevel Current-Source Inverters Using Inductor Modules

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

This paper presents a comparative discussion of new multilevel current-source inverters (CSIs) based on an H-bridge CSI with inductor modules. Component counts of Type1 and Type2 circuit topologies are compared, where the Type2 circuit makes a great reduction of the component counts possible. The simulation results show that each of the circuits can exactly generate the same multilevel current waveforms. However, the Type2 is more effective to achieve more simple implementation and higher efficiency than the Type1.

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

マルチレベルインバータは、電圧形インバータとその対回路である電流形インバータ (CSI) に分けられ、多段の電圧または電流波形を出力することができる。一般的な 2 レベルインバータと比較すると、マルチレベルインバータは dv/dt , di/dt が小さいので EMI ノイズを低減できると同時に出力波形の総合歪率 (THD) を改善することができる。これまで、CSI でもマルチレベル化する手法が幾つか提案されており、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⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、これらのトポロジーは部品点数が多く、導通損低減の観点から問題がある。そこで、筆者らは図 3 や図 4 に示すインダクタモジュール方式に基づく 2 種類の新規トポロジーを提案した⁽³⁾⁽⁴⁾。本稿では、こ

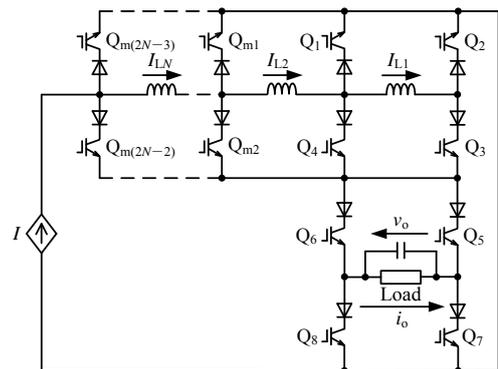


図 3 インダクタモジュール CSI Type1
Fig. 3. Inductor module based CSI Type1.

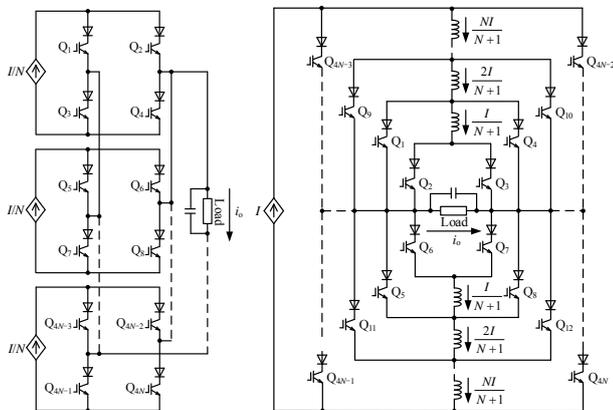


図 1 並列 H ブリッジ CSI
Fig. 1. Parallel H-bridge CSI.

図 2 マルチセル CSI
Fig. 2. Multicell CSI.

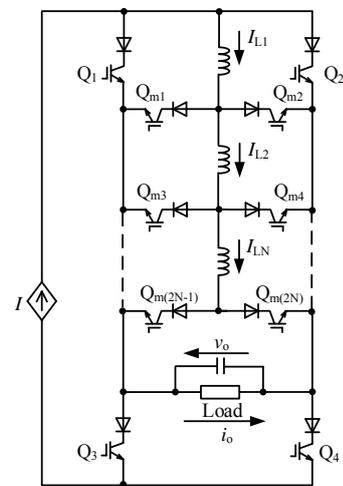


図 4 インダクタモジュール CSI Type2
Fig. 4. Inductor module based CSI Type2.

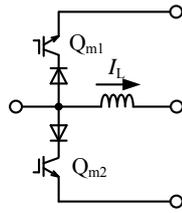


図 5 インダクタモジュール

Fig. 5. Inductor module.

表 1 5 レベルインダクタモジュール CSI Type1 のスイッチング状態

Table 1. Switching states of 5-level inductor module CSI Type1.

Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	<i>i_o</i>
0	0	1	1	0	1	1	0	+I
0	1	0	1	0	1	1	0	+I/2
1	0	1	0	0	1	1	0	+I/2
1	1	0	0	0	1	0	1	0
1	1	0	0	1	0	1	0	0
1	0	1	0	1	0	0	1	-I/2
0	1	0	1	1	0	0	1	-I/2
0	0	1	1	1	0	0	1	-I

表 2 5 レベルインダクタモジュール CSI Type2 のスイッチング状態

Table 2. Switching states of 5-level inductor module CSI Type2.

Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q _{m1}	Q _{m2}	<i>i_o</i>
1	0	0	1	1	0	+I
1	0	0	1	0	1	+I/2
0	1	0	1	1	0	+I/2
0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	0
0	1	1	0	1	0	-I/2
1	0	1	0	0	1	-I/2
0	1	1	0	0	1	-I

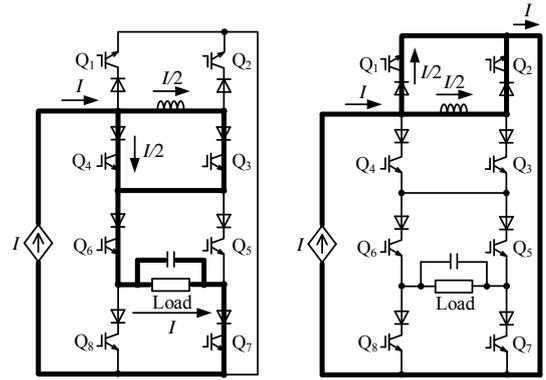
れら 2 種類のインダクタモジュール CSI について、トポロジーとシミュレーション結果の比較検討を行ったので報告する。

2. 回路構成と動作原理

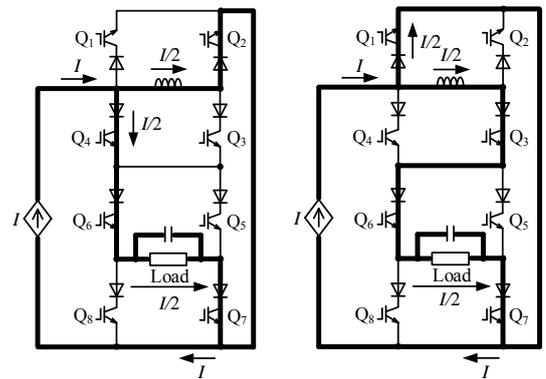
図 3 にインダクタモジュール CSI Type1 を示す。また、図 4 に素子数をより低減したインダクタモジュール CSI Type2 を示す。両者とも、Hブリッジ CSI を主インバータとして、図 5 に示すトランジスタ、ダイオード、インダクタだけで構成されたインダクタモジュールを組み合わせたものである。スイッチング状態の冗長性を利用しながら、インダクタモジュールの充電と放電モードを切り換えることでインダクタ電流を一定に保ちつつマルチレベル電流を出力する。インダクタモジュールの数を N 、出力電流のレベル数を M とおくと、どちらの回路でも次の関係式が成り立つ。

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

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、インダクタモジュール CSI Type1 においては漸化式(2)、インダクタモジュール CSI Type2 においては漸化式(3)を満足するようにインダクタ電流を一定に保つ。

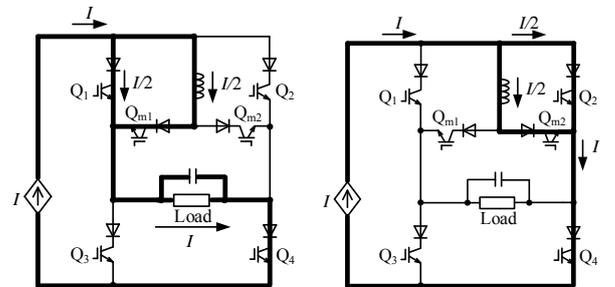


(a) 電流保持モード ($i_o = +I$) (b) 電流保持モード ($i_o = 0$)
(a) Current holding mode ($i_o = +I$). (b) Current holding mode ($i_o = 0$).

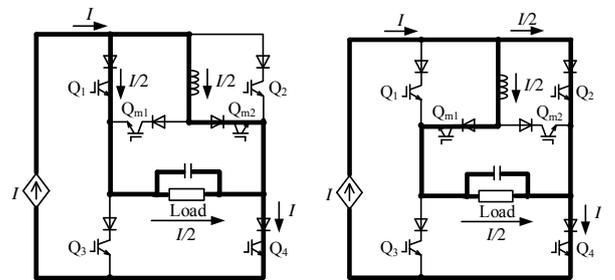


(c) 充電モード ($i_o = +I/2$) (d) 放電モード ($i_o = +I/2$)
(c) Charging mode ($i_o = +I/2$). (d) Discharging mode ($i_o = +I/2$).

図 6 5 レベルインダクタモジュール CSI Type1 の動作モード
Fig. 6. Operation modes of 5-level inductor module CSI Type1.



(a) 電流保持モード ($i_o = +I$) (b) 電流保持モード ($i_o = 0$)
(a) Current holding mode ($i_o = +I$). (b) Current holding mode ($i_o = 0$).



(c) 充電モード ($i_o = +I/2$) (d) 放電モード ($i_o = +I/2$)
(c) Charging mode ($i_o = +I/2$). (d) Discharging mode ($i_o = +I/2$).

図 7 5 レベルインダクタモジュール CSI Type2 の動作モード
Fig. 7. Operation modes of 5-level inductor module CSI Type2.

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

$$I_{L(k+1)} = I_{L(k)} - \frac{I}{N+1} \quad k=1, 2, \dots, N \quad I_{L1} = \frac{N}{N+1} I \quad (3)$$

5 レベル電流を出力する場合のスイッチング状態を表 1, 表 2 に示す。また, 動作モードを図 6, 図 7 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。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, 中間レベル $i_o = +I/2$ を出力する。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し, やはり中間レベル $i_o = +I/2$ を出力する。提案回路は, この冗長性のあるスイッチング状態を利用することで, インダクタモジュール電流を一定に保ちつつ負荷に $I/2$ を供給する。インダクタモジュール CSI Type1 とインダクタモジュール CSI Type2 の 5 レベル出力における通流素子数の比較を表 3 に示す。ただし, カウント数はトランジスタとダイオードの直列対で 1 とし, 通流電流の大小は問わないとする。ゼロレベル $i_o = 0$ を出力する場合, インダクタモジュール CSI Type1 は外側の支路に電流を流すため, 通流素子数はインダクタモジュール CSI Type2 より 1 個少ない。一方, 最大レベル $i_o = +I$ を出力する場合と中間レベル $i_o = +I/2$ を出力する場合は, インダクタモジュール CSI Type2 の方が 1 個少ない。そのため, 出力電流基本波の正の半サイクルで合計通流素子数は, インダクタモジュール CSI Type1 で 14 個, インダクタモジュール CSI Type2 で 12 個となる。

さらに, 両インダクタモジュール CSI を構成する部品点数を数え上げた結果を表 4 に示す。インダクタモジュール CSI Type2 は, より少ない部品点数で構成できることがわかる。また, レベル数を増加しても必要なゲートドライブ電流源は 3 個で一定であることもわかる。

3. シミュレーションによる運転特性の比較評価

<3.1> 5 レベル出力時のシミュレーション結果

電源は理想電流源とし $I=6\text{ A}$, 三角波比較法により PWM を行い, そのキャリア周波数と出力基本波周波数はそれぞれ 5 kHz , 50 Hz とした。インダクタモジュールのインダクタンスは 1.8 mH , 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。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 1.2 A に設定した。図 8 にシミュレーション結果を示す。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。どちらの場合も 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正弦波状になっており, I_{L1} はインダクタの充放電により 2 A を保つように制御できている。このとき, 第 30 次高調波までの出力電

表 3 通流素子数の比較

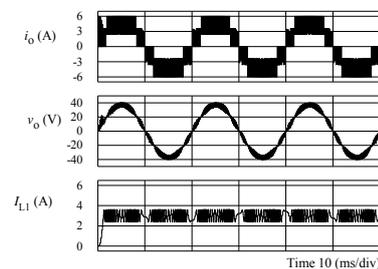
Table 3. Comparison of conduction switching device count.

Operation modes of inductor module	Inductor module CSI Type1	Inductor module CSI Type2
$i_o = +I$ (Current holding mode)	4	3
$i_o = 0$ (Current holding mode)	2	3
$i_o = +I/2$ (Charging mode)	4	3
$i_o = +I/2$ (Discharging mode)	4	3
Total	14	12

表 4 部品点数の比較

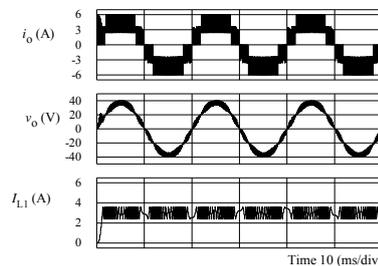
Table 4. Comparison of component count.

Circuit configuration	Inductor module CSI Type1	Inductor module CSI Type2
Switching device	$M+3$	$M+1$
Diode	$M+3$	$M+1$
Inductor	$(M-3)/2$	$(M-3)/2$
Gate drive power supply	4	3
DC current-source	1	1



(a) インダクタモジュール CSI Type1 のシミュレーション結果

(a) Simulation waveforms of inductor module CSI Type1.



(b) インダクタモジュール CSI Type2 のシミュレーション結果

(b) Simulation waveforms of inductor module CSI Type2.

図 8 5 レベル出力時のシミュレーション結果

Fig. 8. Simulation results of 5-level output operation.

流 THD は, インダクタモジュール CSI Type1 で 0.612% , インダクタモジュール CSI Type2 で 0.625% となった。

<3.2> 7 レベル出力時のシミュレーション結果

7 レベル電流を出力する場合のスイッチング状態を表 5, 表 6 に示す。この場合, インダクタ電流を先に述べた漸化式に基づき, $I/3$ と $2I/3$ に一定に保つ必要がある。インダクタモジュールのインダクタンスは 9 mH とし, ヒステリシス幅は 0.2 A に設定した。その他の条件は 5 レベル出力時と同じである。図 9 にシミュレーション結果を示す。両者とも出力電流波形は 7 レベルであり, 負荷電圧はフィルタキャパシタによって正弦波状になっていることがわかる。また, インダクタ電流はそれぞれ 2 A と 4 A を保つように制御でき

表 5 7レベルインダクタモジュール CSI Type1 の
スイッチング状態

Table 5. Switching states of 7-level inductor module based CSI Type1.

Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q _{m1}	Q _{m2}	出力
0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	+I
1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	+2I/3
0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	+2I/3
0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	+2I/3
0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	+I/3
1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	+I/3
1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	+I/3
1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0
1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0
1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	-I/3
1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	-I/3
0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	-I/3
0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	-2I/3
0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	-2I/3
1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	-2I/3
0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	-I

表 6 7レベルインダクタモジュール CSI Type2 の
スイッチング状態

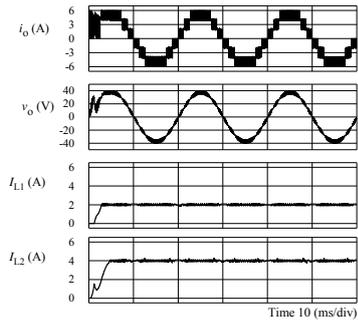
Table 6. Switching states of 7-level inductor module based CSI Type2.

Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q _{m1}	Q _{m2}	Q _{m3}	Q _{m4}	出力
1	0	0	1	1	0	1	0	+I
0	1	0	1	1	0	1	0	+2I/3
1	0	0	1	0	1	1	0	+2I/3
1	0	0	1	1	0	0	1	+2I/3
0	1	0	1	0	1	1	0	+I/3
0	1	0	1	1	0	0	1	+I/3
1	0	0	1	0	1	0	1	+I/3
0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	0
0	1	1	0	1	0	1	0	-I/3
1	0	1	0	0	1	1	0	-I/3
1	0	1	0	1	0	0	1	-I/3
0	1	1	0	0	1	1	0	-2I/3
0	1	1	0	1	0	0	1	-2I/3
1	0	1	0	0	1	0	1	-2I/3
0	1	1	0	0	1	0	1	-I

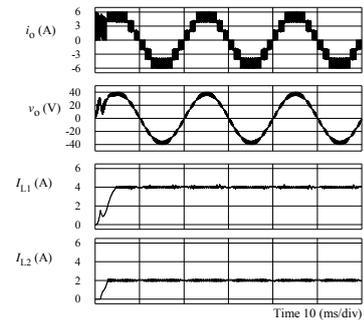
ている。このとき、第 30 次高調波までの出力電流 THD は、インダクタモジュール CSI Type1 の場合 0.232 %、インダクタモジュール CSI Type2 の場合 0.217 %であった。

4. まとめ

本稿では、インダクタモジュールを用いた 2 種類の新規マルチレベル CSI について、回路トポロジーの比較を行った。また、5 レベルならびに 7 レベル出力時のシミュレーション



(a) インダクタモジュール CSI Type1 のシミュレーション結果
(a) Simulation waveforms of inductor module CSI Type1.



(b) インダクタモジュール CSI Type2 のシミュレーション結果
(b) Simulation waveforms of inductor module CSI Type2.

図 9 7レベル出力時のシミュレーション結果
Fig. 9. Simulation results of 7-level output operation.

を行い、出力電流波形の THD を比較評価した。その結果、インダクタモジュール CSI Type2 ではインダクタモジュール CSI Type1 に比べて、ゲートドライブ電源を 1 個少なくでき、出力レベル数に関係なく 3 個で一定であることがわかった。また、トランジスタとダイオードの数は、出力レベル数に関係なく常に 2 個少なくできることがわかった。出力電流波形の THD 差は、5 レベル出力時 0.013 pt、7 レベル出力時 0.015 pt であり、どちらの回路もほぼ同じ波形を出力することができる。したがって、同じマルチレベル出力電流を得たい場合、部品点数が少ないインダクタモジュール CSI Type2 は、一層の小型化、高効率化に寄与することが期待できる。

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電流形インバータの提案」, 平成 25 年電気学会全国大会, Vol. 4, pp. 61-62 (2013)
- (4) Tran Thi Lam Quyen・野口季彦:「インダクタモジュールを利用したマルチレベル電流形インバータの新規トポロジー」, 平成 27 年電気学会全国大会, Vol. 4, pp. 248-249 (2015)