

# カスケードHブリッジコンバータにおける 電力アンバランス抑制制御

学生員 安田 匠      上級会員 伊東 淳一（長岡技術科学大学）

## Power Unbalance Suppression Control for Cascaded H-Bridge Converter

Takumi Yasuda, Student Member, and Jun-ichi Itoh, Senior Member (Nagaoka University of Technology)

Cascaded H-bridge (CHB) converters have a limit of compensation capability for power unbalance among cascaded cells. DC/DC converters on the load side of each cell are required to curtail the load power when the voltage balancing controller of AC/DC converters saturates. In this paper, voltage margin control (VMC) is applied as the load controller, which curtail the load power without communication between the DC/DC converters and the AC/DC converters when the voltage balancing controller saturates. However, the steady error of the capacitor voltage appears when the capacitor voltage balancing controller saturates and the VMC curtail the output power, which causes a steady error of the capacitor voltage in the cells whose output power is not curtailed. This paper proposes an operation method to minimize the capacitor voltage deviation caused by the VMC operating under the saturation of the capacitor voltage balancing control due to the large power unbalance. The experimental results show that the CHB converter balances the capacitor voltage by suppressing the power unbalance with the proposed controller.

キーワード：カスケードHブリッジコンバータ，負荷アンバランス，Voltage margin control，キャパシタ電圧バランス制御。  
Keywords：Cascaded H-bridge (CHB) converter, Load unbalance, Voltage margin control, Capacitor voltage balancing control.

### 1. はじめに

近年，PV やバッテリー用途として AC/DC コンバータを直列接続したカスケードHブリッジコンバータ（以下，CHBコンバータ）が盛んに研究されている<sup>(1)(2)</sup>。本コンバータは直列接続によって商用トランスを用いることなく直接高压系統に接続できる。

図1にCHBコンバータを示す。本回路は直列接続されたAC/DCコンバータの直流側にそれぞれDC/DCコンバータを介して負荷が接続される。各セルに接続された負荷が独立して動作するため，セル間に電力アンバランスが発生する。AC/DCコンバータの入力側交流電圧を異なる値とすることによって各セルへの入力電力を調整し，キャパシタ電圧をバランスできる<sup>(3)(4)</sup>。一方で，AC/DCコンバータの入力側交流電圧振幅はキャパシタ電圧で制限されるため，AC/DCコンバータが補償可能な最大電力アンバランスはコンバータ内の負荷の総和に依存して制限される<sup>(5)(7)</sup>。よって，各セルのDC/DCコンバータは，電力アンバランスがAC/DCコンバータの補償限界以内となるよう，CHBコンバータの総負荷を考慮して出力を制限する必要がある。しかし，これまでにAC/DCコンバータの電力アンバランスに対

する補償限界を考慮したAC/DCコンバータおよびDC/DCコンバータの制御に関して十分に検討されていない。

負荷条件がAC/DCコンバータによる電力アンバランスの補償限界を超えた場合，AC/DCコンバータがキャパシタ電圧を制御できなくなるため，DC/DCコンバータは定電力（定電流）制御からキャパシタ電圧制御へ切り替える必要がある。これを実現する制御として，Voltage Margin Control（以

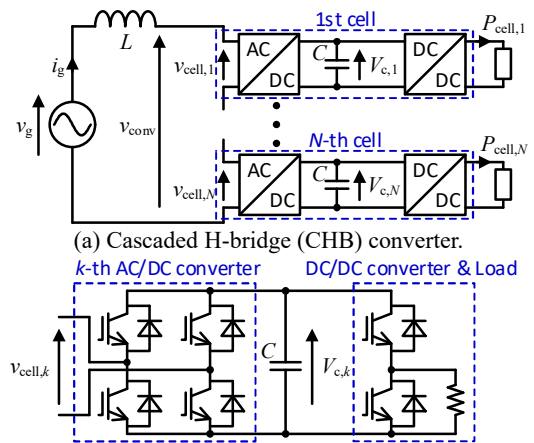


Fig. 1. Circuit diagram of CHB converter with individual load.

下, VMC) が提案されている<sup>(8)</sup>。VMC を DC/DC コンバータに適用することで, DC/DC コンバータは AC/DC コンバータとの信号の授受なく電圧バランス制御の補償限界を検出し, 出力電力を抑制できる。しかし, VMC によって出力抑制されたセルのキャパシタ電圧には定常偏差が発生する。この定常偏差が AC/DC コンバータの平均電圧制御のフィードバック値に重畳されるため, VMC を CHB コンバータに適用する場合, 出力抑制されていないセルのキャパシタ電圧にも定常偏差が発生する。

本論文では VMC による AC/DC コンバータのキャパシタ電圧制御への干渉を防止する手法を提案する。提案制御では, AC/DC コンバータの電圧バランス制御の出力が飽和していないセルのキャパシタ電圧のみを平均キャパシタ電圧として電圧制御を行うことによって, VMC によるキャパシタ電圧の定常偏差の影響を抑制する。その結果, 出力電力が抑制されていないセルのキャパシタ電圧を指令値に誤差なく追従させる。以上の提案法を 4 セルで構成したミニモデルで実験検証し, AC/DC コンバータの動作範囲を超えた電力アンバランスを適用した際にもキャパシタ電圧をバランスし, 出力電力が抑制されていないセルのキャパシタ電圧偏差を 0.4% に抑制できることを確認したので報告する。

## 2. CHB コンバータの回路構成と制御法

図 2 に AC/DC コンバータの制御概要図を示す<sup>(3)(4)</sup>。AC/DC コンバータの制御は交流電流制御と電圧制御で構成される。平均電圧制御は全セルの平均キャパシタ電圧  $V_{c,avg}^*$  を指令値  $V_c^*$  へ制御する。平均電圧制御の出力は系統電流有効成分実効値であり, 損失を無視すると CHB コンバータの総負荷を系統電圧で除した値に一致する。電圧バランス制御は, 各セルのキャパシタ電圧を  $V_{c,k}^*$  へ制御することによって, セル間のキャパシタ電圧偏差をゼロに制御する。電圧バランス制御の出力は AC/DC コンバータの入力側交流電圧に重畳される補償電圧  $v_{\delta,k}$  である。過変調を回避するため, 各 AC/DC コンバータの入力側交流電圧振幅は直流リンク電圧以下とする必要がある。

$$-V_{c,k} \leq \frac{v_{conv}^*(t)}{N} + v_{\delta,k}^*(t) \leq V_{c,k} \quad (1)$$

ただし,  $V_{c,k}$  はセル  $k$  のキャパシタ電圧,  $v_{conv}^*$  は AC/DC コンバータの入力側交流電圧指令値の総和,  $N$  はコンバータ内セル数である。AC/DC コンバータが動作可能な電力範囲は (1)式に交流電流  $i_g$  を乗じて周期平均することで得られ, (2)式に表される。

$$-\frac{V_{c,k}}{\sqrt{2}V_g} \sum_{k=1}^N P_{cell,k} \leq P_{cell,k} \leq \frac{V_{c,k}}{\sqrt{2}V_g} \sum_{k=1}^N P_{cell,k} \quad (2)$$

ただし,  $V_g$  は系統電圧実効値,  $P_{cell,k}$  はセル  $k$  の出力電力である。(2)式より AC/DC コンバータの動作範囲は CHB コンバータ内セルの負荷の総和に依存する。負荷が(2)式に示す動作範囲を超えると電圧バランス制御の出力が飽和し, キャパシタ電圧が制御できなくなる。

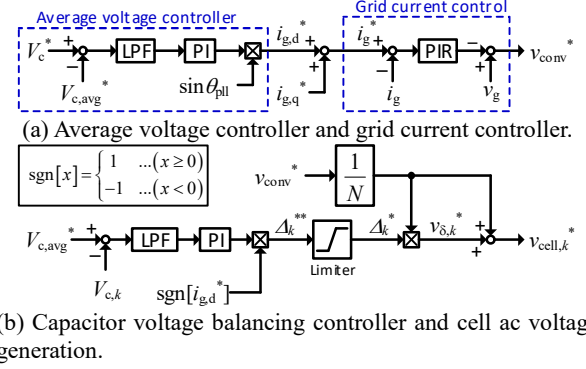


Fig. 2. Control block diagram of cascaded cells.

従来制御では, AC/DC コンバータが入力側交流電圧  $v_{cell,k}$  の過変調を検知し, DC/DC コンバータへ電力指令値を送信することで出力制限を行う<sup>(6)(9)</sup>。しかしこの方法はキャパシタ電圧の大きな変動を抑制するため, DC/DC コンバータと AC/DC コンバータ間で比較的高速な通信や信号伝達手段を必要とする。また, セル数が増加すると信号伝達や通信が煩雑化する上, 演算コストが増加する。そこで本論文では, DC/DC コンバータと AC/DC コンバータ間の通信を用いずに電力アンバランスを制限し, 電圧バランス制御の出力飽和時にもキャパシタ電圧を制御する手法を提案する。

## 3. 提案する電力アンバランス抑制制御法

本論文では, CHB コンバータにおける各セルの DC/DC コンバータに VMC を適用する。セル間の電力アンバランスが比較的小さい条件では, 図 2 に示す電圧バランス制御によって AC/DC コンバータの電圧バランス制御がキャパシタ電圧を制御する。一方で, セル間の電力アンバランスが(2)式に示す動作範囲外となった場合, 電圧バランス制御の出力は最大値(最小値)で飽和するため, AC/DC コンバータはキャパシタ電圧を制御できなくなる。この場合, DC/DC コンバータが出力を制限することでキャパシタ電圧バランスを達成する。つまり, 負荷の状態に応じて, AC/DC コンバータと DC/DC コンバータで電圧制御を切り替える。

### 3-1) Voltage Margin Control (VMC)

本節では, CHB コンバータへ VMC を適用するときのパラメータ設計指針について述べる。VMC では, キャパシタ電圧から間接的に電圧バランス制御の出力が飽和したことを検出し, DC/DC コンバータで電力抑制を行う。

図 3 に DC/DC コンバータに適用する VMC の制御ブロックを示す。VMC は, 指令値をキャパシタ電圧偏差の正負のしきい値に設定された 2 つの PI 制御によって構成される。AC/DC コンバータの電圧バランス制御の出力が飽和していない条件では  $V_{c,k}$  が指令値  $V_c^*$  に一致するため, VMC の PI 制御の出力はそれぞれ正負の最大値に飽和する。ここで, 各 PI 制御出力の最大および最小値は(3)式に示される。

$$0 \leq P_{th1}^* \leq P_{cell,n}, \quad -P_{cell,n} \leq P_{th2}^* \leq 0 \quad (3)$$

ただし,  $P_{cell,n}$  はセルの定格電力である。一方で, 負荷が(2)

式に示す電圧バランス制御の動作範囲を超えた場合、キャパシタ電圧は指令値  $V_c^*$  から発散する。キャパシタ電圧偏差がしきい値 ( $V_c^* \pm \Delta V_{c,th}$ ) を超えた場合、PI 制御によってキャパシタ電圧がしきい値へ制御される。(2)に示すように、AC/DC コンバータの電力アンバランスに対する動作範囲はコンバータの平均負荷に依存して変化するが、VMC は任意の負荷条件において電圧バランス制御の補償限界を検出できる。

VMC の PI 制御はキャパシタ電圧制御に用いられるため、カスケード制御におけるメジャー制御器と同様の設計を行っている<sup>(10)</sup>。VMC のしきい値  $\Delta V_{c,th}$  を小さくすると、出力電力抑制時のキャパシタ電圧の定常偏差を減少できる一方で、負荷変動に起因する僅かなキャパシタ電圧変動によって出力抑制が行われる。そのため、 $\Delta V_{c,th}$  は上記のトレードオフを考慮して設計する必要がある。本検証では  $\Delta V_{c,th}$  をキャパシタ電圧指令値の 5% と設定する。

### (3・2) キャパシタ電圧制御

本節では、VMC による AC/DC コンバータの平均電圧制御への干渉を防止し、電圧バランス制御が飽和していないセルにおけるキャパシタ電圧偏差の抑制手法を提案する。

図 2 に示す AC/DC コンバータの平均電圧制御では、全セルの平均キャパシタ電圧を指令値に追従させる。VMC によってセルに定常的なキャパシタ電圧偏差が発生した場合、平均電圧制御にフィードバックされる平均キャパシタ電圧に定常偏差が重畳される。ここで、 $N_{sat,p}$  および  $N_{sat,n}$  をそれぞれセルの電圧バランス制御出力が正および負の最大値で飽和したセル数と定義する。これらのセルでは、VMC の動作によってそれぞれキャパシタ電圧に定常偏差  $\pm \Delta V_{c,th}$  が発生する。平均電圧制御によって平均キャパシタ電圧  $V_{c,avg}$  が指令値  $V_c^*$  に追従した結果、電圧バランス制御の出力が飽和していない ( $N - N_{sat,p} - N_{sat,n}$ ) セルの平均キャパシタ電圧  $V_{c,rest}$  が (4) 式となり、指令値  $V_c^*$  に追従しない。

$$V_c^* = \frac{N_{sat,p}}{N} (V_c^* - \Delta V_{c,th}) + \frac{N_{sat,n}}{N} (V_c^* + \Delta V_{c,th}) + \frac{N - N_{sat,p} - N_{sat,n}}{N} V_{c,rest}$$

$$\therefore V_{c,rest} = V_c^* + \frac{N_{sat,p} - N_{sat,n}}{N - N_{sat,p} - N_{sat,n}} \Delta V_{c,th} \quad (4)$$

電圧バランス制御出力が飽和していないセルにおいては、キャパシタ電圧が指令値に対して誤差なく追従することが望ましい。

そこで本論文で提案する方式では、図 2 の平均キャパシタ電圧  $V_{c,avg}^*$  を電圧バランス制御の出力の飽和が発生していないセルのみの平均キャパシタ電圧とする。

$$V_{c,avg}^* = \frac{1}{n_{sat}} \sum_{k=1}^N S_{sat,k} V_{c,k}, \quad n_{sat} = \sum_{k=1}^N S_{sat,k} \quad (5)$$

ただし、 $S_{sat,k}$  は当該セルの電圧バランス制御の出力が飽和している場合に 0、それ以外では 1 とする。平均電圧制御のフィードバックおよび電圧バランス制御の指令値として (5) 式を採用することによって、定常偏差が発生しているセルのキャパシタ電圧が AC/DC コンバータの電圧制御系に与える影響を防止し、電圧バランス制御の出力が飽和していない

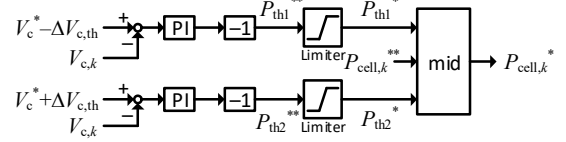


Fig. 3. Control block diagram of voltage margin control.

Table I. Experimental conditions.

Parameter	Symbol	Value
Rated power	$P_{rate}$	3.1 kW
Grid voltage	$V_g$	240 V (RMS)
Grid frequency	$f_g$	50 Hz
Rated capacitor voltage	$V_c$	120 V
Arm inductance	$L$	5.0 mH (8.4%)
Cell capacitance	$C$	2.72 mF (25.5 mJ/VA)
Carrier frequency	$f_{car}$	6 kHz
Number of cells	$N$	4

セルのキャパシタ電圧偏差をゼロに抑制できる。このとき、電圧バランス制御の出力が飽和していないセル数  $n_{sat}$  が変動することによって、(5) 式の  $V_{c,avg}^*$  が変動する。しかし、この変動による影響はキャパシタ電圧リップル除去のために挿入されるローパスフィルタ (図 2(a)–(b)内、LPF) によって無視できる程度に低減される。

## 4. 実機検証

表 1 に実験条件を示す。本論文では簡単化のため、DC/DC コンバータおよび負荷を図 1(b)に示すようなチョップパと抵抗を用いて実現する。チョップパのデューティ比  $d_{load,k}$  は、VMC が出力する電力指令値  $P_{cell,k}^*$  を定格電力  $P_{cell,n}$  で除することによって得られる。

図 4 に提案制御を適用した CHB コンバータの定常動作波形を示す。ここでは、セル 1 および 2 の負荷指令値を 1p.u., セル 3 および 4 の負荷指令値を 0.2p.u. に設定している。本条件は (2) 式から計算される電圧バランス制御の動作範囲外である。図 4(a) は AC/DC コンバータの変調波である。セル 1 および 2 の変調波振幅がほぼ 1 で飽和しているが、過変調は発生していない。図 4(b) は系統電圧および電流波形である。提案制御により、大きな電力アンバランスを設定した場合においても系統電流ひずみ率は 2.22% に抑制されている。図 4(c) は各セルのキャパシタ電圧波形である。セル 1 および 2 において電圧バランス制御の出力が飽和しているため、出力電力が抑制され、VMC における PI 制御の指令値 ( $V_c^* + \Delta V_{c,th}$ ) である 114 V に一致している。このとき、PI 制御の出力が飽和していないセル 3 および 4 のキャパシタ電圧は指令値である 120 V に最大誤差 0.4% で追従している。

図 5 に従来の AC/DC コンバータの電圧制御に対して VMC を適用した結果を示す。セル 1 および 2 に加えて、電圧バランス制御の出力が飽和していないセル 4 においても 10.6% の定常的なキャパシタ電圧偏差が発生している。これは VMC によるキャパシタ電圧の定常偏差が AC/DC コンバータの電圧制御に影響していることが原因である。

図 6 にセル 1 において出力電力指令値が 0.4p.u. から 1p.u. にステップ変化したときの動作を示す。電力が変化するこ

とで、負荷条件が(2)式に示す AC/DC コンバータの電力アンバランスに対する補償範囲外となる。その結果、電圧バランス制御の出力が飽和するため、図 8 に示すように VMC が出力電力を約 0.76p.u. に抑制している。セル 1 のキャパシタ電圧はしきい値である 114 V に追従している。また、セル 2 のキャパシタ電圧は 120 V に追従しており、他のセルにおいて発生した負荷変動の影響をほとんど受けない。

図 7 は、セル 1 の出力電力が VMC によって抑制されている条件において、セル 2 の出力電力指令値が増加した場合の過渡動作波形である。負荷変動の結果、コンバータ内の総電力が変化するため、負荷条件が(2)式によって求められる AC/DC コンバータの補償範囲内となる。その結果、セル 1 の出力電力は増加し、指令値である 0.9p.u. に一致している。つまり、VMC によってセル間の負荷情報を授受することなく、AC/DC コンバータの補償限界に応じた出力電力調整が可能である。また、負荷変動によってキャパシタ電圧は指令値である 120 V に追従している。

## 5. まとめ

本論文では CHB コンバータにおいて、VMC による AC/DC コンバータのキャパシタ電圧制御への干渉を防止する手法を提案した。提案制御では、電圧バランス制御の出力が飽和していないセルのキャパシタ電圧のみを平均キャパシタ電圧として電圧制御を行うことで、VMC によるキャパシタ電圧の定常偏差の影響を抑制する。その結果、出力電力が抑制されていないセルのキャパシタ電圧を指令値に追従させる。実験結果より、提案制御を用いることによって、AC/DC コンバータの動作範囲を超えた電力アンバランスを適用した際にもキャパシタ電圧をバランスし、出力電力が抑制されていないセルのキャパシタ電圧偏差を 10.6% から 0.4% に低減できることを確認した。

## 文 献

- (1) I. Marzo et al.: "Power Balancing in Cascaded H-Bridge and Modular Multilevel Converters Under Unbalanced Operation: A Review", IEEE Access, Vol. 9, pp. 110525-110543 (2021)
- (2) A. I. Elsanabary et al.: "Medium Voltage Large-Scale Grid-Connected Photovoltaic Systems Using Cascaded H-Bridge and Modular Multilevel Converters: A Review" IEEE Access, Vol. 8, pp. 223686-223699 (2020)
- (3) J. A. Barrena et al.: "Individual Voltage Balancing Strategy for PWM Cascaded H-Bridge Converter-Based STATCOM", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 55, No. 1, pp. 21-29 (2008)
- (4) T. Zhao et al.: "Voltage and Power Balance Control for a Cascaded H-Bridge Converter-Based Solid-State Transformer", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 28, No. 4, pp. 1523-1532, (2013)
- (5) L. Liu et al.: "Reactive Power Compensation and Optimization Strategy for Grid-Interactive Cascaded Photovoltaic Systems", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 30, No. 1, pp. 188-202 (2015)
- (6) T. Zhao et al.: "Harmonic Compensation Strategy for Extending the Operating Range of Cascaded H-Bridge PV Inverter", IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron., Vol. 8, No. 2, pp. 1341-1350 (2020)
- (7) S. Yang et al.: "Quantitative Comparison and Analysis of Different Power Routing Methods for Single-Phase Cascaded H-Bridge Photovoltaic Grid-Connected Inverter", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 36, No. 4, pp. 4134-4152 (2021).

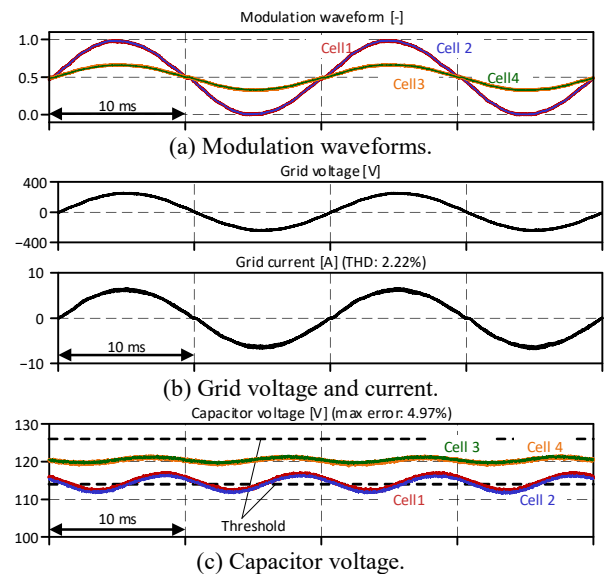


Fig. 4. Experimental results of steady-state operation of CHB converter. Load command of cell 1 and 2 are set to 1p.u. while that of cell 3 and 4 are set to 0.2p.u.

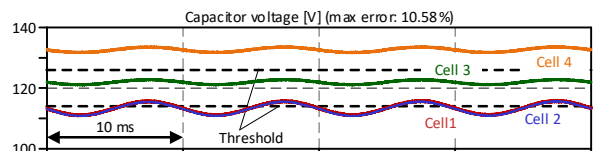


Fig. 5. Experimental results of capacitor voltage with conventional voltage balancing controller. The loading conditions are same with Fig. 4.

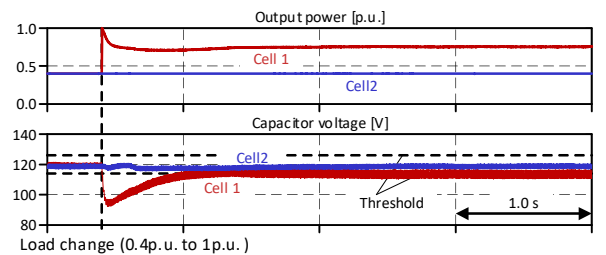


Fig. 6. Experimental results of transient behavior when load command of cell 1 is changed from 0.4p.u. to 1p.u. Load command of cell 2 is set to 0.4p.u.

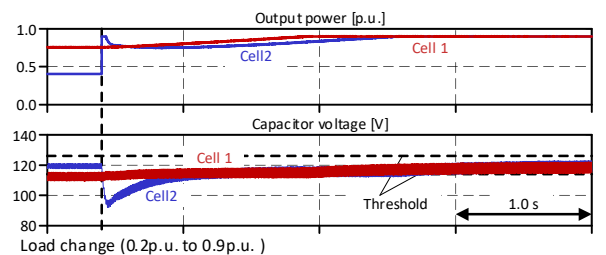


Fig. 7. Experimental results of transient behavior when load command of cell 2 is changed from 0.4p.u. to 0.9p.u. Load command of cell 1 is set to 0.9p.u.

- (8) K. Sakamoto et al.: "Development of a control system for a high-performance self-commutated AC/DC converter", IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 13, No. 1, pp. 225-232 (1998)
- (9) T. Zhao et al.: "An Optimized Third Harmonic Compensation Strategy for Single-Phase Cascaded H-Bridge Photovoltaic Inverter", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 65, No. 11, pp. 8635-8645 (2018)
- (10) 伊東淳一・伊東洋一・他：「パワーエレクトロニクス技術教科書」，CQ 出版社 (2014)