

MMC を用いたマルチポート変換器の瞬時電力に着目した アーム内バランス制御の動作範囲拡大

学生員 安田 匠 上級会員 伊東 淳一 非会員 Giuseppe Guidi

Intra-arm Balancing Controller with Extended Compensation Capability for Power Unbalance focusing on Instantaneous power for Multi-port Converter based on MMC

Takumi Yasuda, Student Member, Jun-ichi Itoh, Senior-member, Non-Member Giuseppe Guidi

A balancing controllers of a multi-port converter with a modular multilevel converter (MMC) compensate the power unbalance between the cascaded cells with compensation voltage injection to cell voltage. The balancing capability is limited by the dc voltage of the cell. This paper proposes a balancing control method with an extended compensation capability. The proposed balancing controller compensates the power unbalance with the compensation voltage calculated from an instantaneous arm voltage command and a polarity of the arm current. The experimental result verifies that the proposed controller compensates the power unbalance of 183% larger than the theoretical limit of the conventional controller.

キーワード : モジュラーマルチレベルコンバータ, アーム内バランス制御, マルチポート変換器

Keywords : Modular multilevel converter, Intra-arm balancing controller, Multi-port converter

1. はじめに

再生可能エネルギーの普及に伴い、モジュラーマルチレベルコンバータ (MMC) を用いた大容量マルチポート変換器が盛んに研究されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。本回路は直列接続された AC/DC 双方向変換器で構成されるため、商用トランスを用いずに高圧系統に直接接続することができる。その結果、低圧系統に接続する従来のシステムに比較して、体積やコストの低減が可能である⁽⁴⁾。

図 1 に MMC を用いたマルチポート変換器を示す。各セルの直流側にはそれぞれ独立してバッテリーや PV が接続されるため⁽¹⁾⁻⁽³⁾、各セルの入出力電力に偏差が発生する可能性がある。このとき、マルチポート変換器は系統へ影響を与えることなくセル間で電力融通を行う必要がある。異なるアームに接続されたセル間の電力融通には循環電流が用いられる⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。一方で、同一アーム内のセル間では、各セルの電圧指令値に補償電圧を重畳することによって電力融通を行う^{(3),(5)-(9)}。このとき、補償電圧によってセルが過変調になると系統電流ひずみが発生するため、アーム内の電力偏差の補償能力には限界がある。各ポートの入出力電力にできるかぎり制約を与えずに動作を行うためには、マルチポート変換器のアーム内の電力偏差に対する補償範囲を拡大することが求められる。

これまで、各セル電圧へ高調波を重畳することによって過変調を抑制する手法が提案されている⁽⁶⁾⁻⁽⁷⁾。また、セル電圧の直流と系統周波数成分の比を調整することによって動作範囲が最大となる比を選択する手法が提案されている⁽⁸⁾。しかし、これまでに提案された手法では、直流、系統周波数、高調波成分のいずれかを考慮していないため、アーム内電力偏差に対する補償能力には改善の余地が残される。

本論文では、直流、系統周波数、高調波成分の全てを考慮

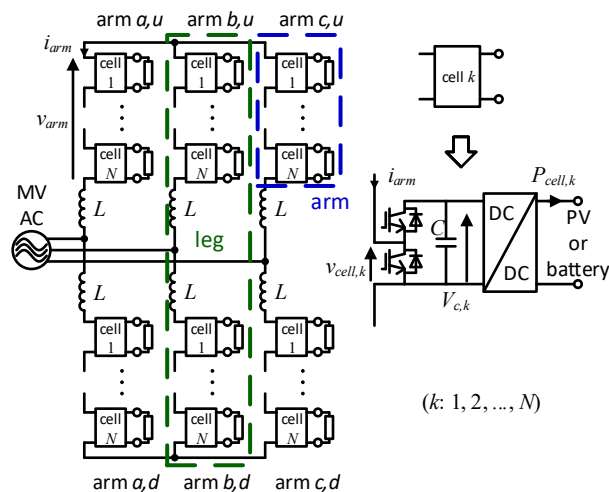


Fig. 1. Multi-port converter based on MMC.

したアーム内バランス制御を提案する。提案制御では、アーム電圧指令値の瞬時値とアーム電流の方向を用いて補償電力の瞬時最大値を演算することにより、従来よりも大きな電力偏差を補償できる。実機実験によって提案制御が従来制御の理論限界よりも 187%大きな電力偏差を補償できることを確認した。

2. MMC を用いたマルチポート変換器とその制御法

(2・1) 回路構成 図 1 に示すマルチポート変換器では、各セルの直流側に負荷を接続している。MMC と同様の回路構成とすることによって、商用トランスを用いずに 6.6 kV 等の高圧系統に連系できる。その結果、システム容量が商用トランスの容量に拘束されず、接続可能なセル数に制限がない。加えて、マルチレベル電圧を出力することで交流側電流ひずみを抑制でき、交流側フィルタを小型できる。

(2・2) 制御器構成 図 2 にマルチポート変換器の制御方法の概要を示す。本制御器は、6 つの制御器の出力に基づいて各セル電圧の指令値を決定する。平均電力制御 (Average power controller) は、システム全体の入出力電力を制御する。相間バランス制御 (Leg balancing controller) は、直流循環電流によって 3 相の平均電力の偏差を補償する。また、上下アームバランス制御 (Arm balancing controller) は、系統周波数成分の循環電流によって上下アーム間の平均電力偏差を補償する。最後に、アーム内バランス制御 (Intra-arm balancing controller) は、各セルへ異なる補償電圧を重畳することによって 1 アーム内セル間の電力偏差を補償する。本論文では、それぞれの制御は PI 制御によって構成する。

図 3 にアーム内バランス制御のブロック図を示す。アーム内バランス制御では、各セルへ異なる補償電圧を重畳することによって、アーム内セル間の直流電圧偏差を補償する。ここで、セル k の補償電圧 $v_{\delta k}$ はセル k の PI 制御の出力 $V_{\delta k}$ と基準波形 $g(t)$ の積となる。PI 制御の出力 $V_{\delta k}$ はセルの直流電圧のアーム内平均値に対する偏差であるため、1 アーム内の総和はゼロとなる。つまり、1 アーム内のセル電圧の総和は(1)式に示される。

$$\sum_{k=1}^N v_{cell,k} = \sum_{k=1}^N \left(\frac{v_{arm}^*}{N} + v_{\delta,k} \right) = v_{arm} + g(t) \sum_{k=1}^N V_{\delta,k} = v_{arm} \dots (1)$$

(1)式より、補償電圧 $v_{\delta k}$ は 1 アーム内のセル電圧の和であるアーム電圧 v_{arm} に影響を及ぼさない。したがって、アーム内バランス制御では任意の基準波形 $g(t)$ を選択することができる。これまでに、アーム電圧指令値 v_{arm}^* (6)(7)、アーム電流 i_{arm} (1)、(9)、アーム電流方向 $\text{sgn}[i_{arm}]$ (5) を用いたアーム内バランス制御が提案されている。より振幅の大きな補償電圧 $v_{\delta k}$ をセル電圧へ重畳することによって、より大きな電力偏差を補償することができる。一方で、電流ひずみ抑制の観点より、各セルは過変調せずに動作する必要がある。つまり、基準波形 $g(t)$ は広い電力偏差下においてセル電圧が過変調しないように設定することが求められる。

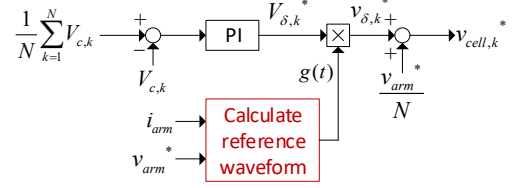


Fig. 3. Generalized intra-arm balancing controller.

3. 提案するアーム内バランス制御

本章では、従来よりも大きな電力偏差を補償可能なアーム内バランス制御を提案する。セル電圧の過変調を防止するためには、セル電圧指令値はゼロ以上かつ直流電圧 V_c 以下である必要がある。つまり、補償電圧 $v_{\delta k}$ の制約は(2)式に示される。

$$-\frac{v_{arm}^*}{N} \leq v_{\delta,k} \leq V_{c,k} - \frac{v_{arm}^*}{N} \dots (2)$$

ここで、 v_{arm}^* はアーム電圧指令値、 N はアーム内セル数、 $V_{c,k}$ はセル k の直流電圧である。(2)式より、アーム電圧指令値が大きい場合は、重畳可能な正の補償電圧は小さくなる。一方で、重畳可能な負の補償電圧は大きくなる。同様に、アーム電圧指令値が小さい場合は、重畳可能な負の補償電圧が小さくなり、重畳可能な正の補償電圧は大きくなる。その結果、セル k が得られる瞬時電力の最大値 $p_{\delta k,max}$ および最小値 $p_{\delta k,min}$ は(3)-(4)式に示される。

$$p_{\delta,k,max} = \begin{cases} \left(V_{c,k} - \frac{v_{arm}^*}{N} \right) i_{arm} & \dots (i_{arm} \geq 0) \\ -\frac{v_{arm}^*}{N} i_{arm} & \dots (i_{arm} < 0) \end{cases} \dots (3)$$

$$p_{\delta,k,min} = \begin{cases} -\frac{v_{arm}^*}{N} i_{arm} & \dots (i_{arm} \geq 0) \\ \left(V_{c,k} - \frac{v_{arm}^*}{N} \right) i_{arm} & \dots (i_{arm} < 0) \end{cases} \dots (4)$$

(3)-(4)式に示すように、アーム電圧指令値およびアーム電流に応じて補償可能な電力偏差が変化する。ここで、アーム内の電力偏差はアームの平均電力に対する偏差であるため、正負に同時に発生する。したがって、アーム内バランス制御の補償能力は正負の両方に広い必要がある。そこで本論文では、正負の電力偏差に対する補償範囲が等しくなるように設計を行う。ここで、正負の電力偏差に対する補償範囲が等しくなる条件は(5)式に示される。

$$-\frac{1}{T_g} \int_0^{T_g} p_{\delta,k,min}(t) dt = \frac{1}{T_g} \int_0^{T_g} p_{\delta,k,max}(t) dt \dots (5)$$

ただし、 T_g は系統周期を示している。(5)式を満足しながら、補償範囲を最大化する基準波形 $g(t)$ を(6)式に示す。

$$g(t) = \frac{\text{sgn}[i_{arm}]}{V_g} \left[\min \left[\frac{v_{arm}^*}{N}, V_c^* - \frac{v_{arm}^*}{N} \right] \right] \dots (6)$$

ただし、 V_c^* はセルの直流電圧指令値である。

図 4 に提案制御を用いた場合の補償電圧の例を示す。正

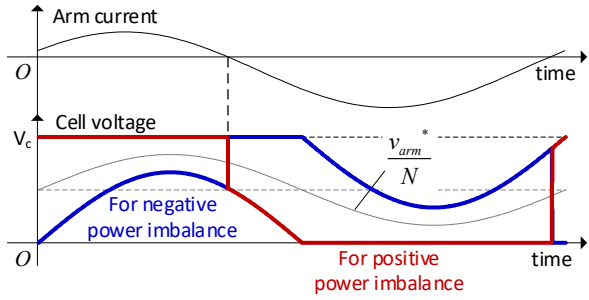
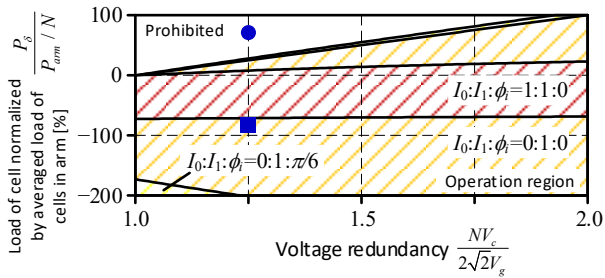
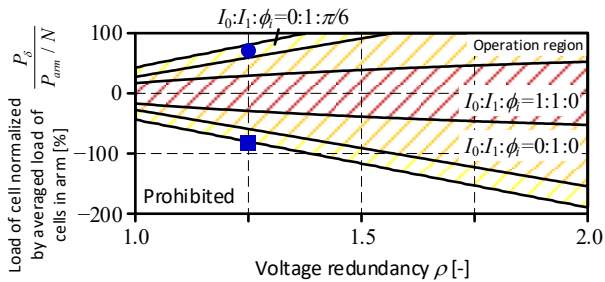


Fig. 4. Example of cell voltage waveform with power unbalance.



(a) Conventional controller using arm current.



(b) Proposed controller.

Fig. 5. Comparison of Compensation capability of intra-arm balancing controllers.

の電力偏差を補償する場合は、アーム電流方向と同じ符号の補償電圧を重畳する。同様に、負の電力偏差を補償する場合は、アーム電流と異なる符号の補償電圧を重畳する。また、アーム電圧の瞬時値に合わせて補償電圧の振幅を調整するため、セル電圧は矩形波に近い波形となる。

図 5 に従来制御と提案制御の補償範囲を比較する。図中の横軸は正規化されたセルの直流電圧、縦軸はアーム内セルの電力平均値で正規化したセルの電力偏差である。 I_0 はアーム電流の直流成分、 I_1 はアーム電流の系統周波数成分、 ϕ はアーム電圧に対するアーム電流の位相差である。なお、図中の丸および四角のプロットは次章の実験条件を示している。アーム内の各セルの電力条件が図中における斜線内に存在する場合、アーム内バランス制御は各セルへ所望の電力を供給できる。一方で、アーム内セルの電力偏差が大きくなり、1 つ以上のセルの電力偏差が斜線外に存在する場合、セル電圧が過変調する。図 5(a) は、基準波形としてアーム電流 i_{arm} を用いた従来制御^{(1),(9)} の補償範囲である。従来制御では、負の電力偏差に対する補償範囲が広い一方で、正の電力偏

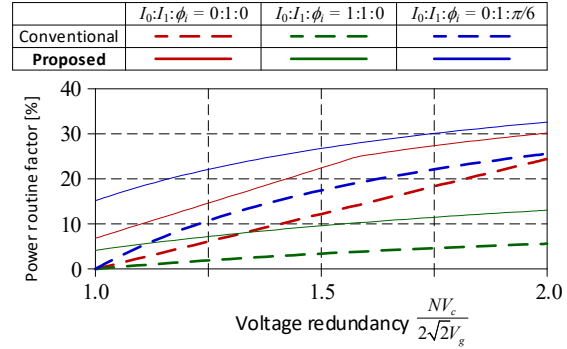


Fig. 6. Comparison of conventional and proposed controller with Power Routine Factor.

Table 1. Experimental conditions

Parameter	Symbol	Value
Rated power of cell	P_{cell}	90 W
Grid line-line voltage	$\sqrt{3}V_g$	122 V (RMS)
Grid frequency	f_g	50 Hz
Number of cells per arm	N	12
Rated capacitor voltage	V_c	21 V
Arm inductance	L	1.5 mH (0.20p.u.)
Cell capacitance	C	15 mF

差に対する補償範囲が狭い。図 5(b) に示す提案制御では、負の電力偏差に対する補償範囲が縮小する一方で、正の電力偏差に対する補償範囲が改善されている。また、従来および提案制御では、セルの直流電圧が増加すると、補償可能な電力偏差が増加する。これは、セルの直流電圧が増加することによって、セル電圧へ重畳可能な補償電圧の振幅が増加するためである。

図 6 に Power Routine Factor (PRF)⁽¹⁰⁾ を用いて補償範囲を評価した結果を示す。PRF は、全負荷条件のうちアーム内バランス制御が電力偏差を補償できる負荷条件の割合を示している。本報告では簡単化のためセル数 $N=2$ としている。比較に用いたすべての電流条件において、提案制御は従来法よりも補償可能な負荷条件の割合が増加している。従来制御では、負の電力偏差に対する補償範囲が広い一方で、正の電力偏差に対する補償範囲が狭い。そのため、従来法の動作範囲は正の電力偏差に対する補償能力に制限される。一方で、提案法では正の電力偏差に対する補償範囲が改善されたため、従来よりも大きな電力偏差に対して動作することが可能となる。なお、本報告では割愛するが、セル数を 3 以上で提案制御を適用した場合でも同等の優位性を確認している。

4. 実験結果

表 1 に実験条件を示す。本論文では、力行動作において提案制御と従来制御の動作検証を行う。アーム電流は $I_0:I_1:\phi=0:1:\pi/6$ 、アーム a,u の電力偏差が $-82\% \sim +71\%$ となるように設定している。図 5 に示すように、本条件は従来制御の理論限界に対して 187% 大きな電力偏差であるのに対し

て、提案制御の理論補償範囲内である。

図 7 にマルチポート変換器における 1 アーム内のセルの変調波およびアーム電流を示す。図 7(a) は従来制御、図 7(b) は提案制御を適用した結果である。両方アーム内に負荷偏差が存在するため、各セルにそれぞれ異なる変調波が与えられている。しかし、図 7(a) では一部のセルの変調波が過変調している。一方で、図 7(b) に示す提案制御による動作波形では、全てのセルが過変調せずに動作している。

図 8 は従来および提案制御を適用した場合のセルの直流電圧を示している。従来制御と提案制御にかかわらず、各セルの直流電圧は指令値である 21 V に追従している。このとき、従来制御を適用した場合のセルの直流電圧偏差は最大 1.0%、提案法では 0.09% である。

図 9 に、従来制御と提案制御を適用した場合の系統電圧および電流波形を示す。図 9(a) に示すように、従来法の系統電流にはひずみが発生している。図 7(a) に示したセルの変調波が過変調していることが原因である。このときの電流ひずみ率は 7.3% である。一方で、提案制御を用いた場合は全セルが過変調せずに動作していることから、図 9(b) に示す提案制御を適用した場合には系統電流ひずみが改善している。このときの電流ひずみ率は 1.5% であり、従来制御に比較して 5.8p.t. 改善している。本結果より、提案したアーム内バランス制御の有用性および理論検討の妥当性が示された。

5. まとめ

本論文では、MMC を用いたマルチポート変換器において、従来よりも大きな電力偏差を補償可能なアーム内バランス制御を提案した。提案制御では、アーム電圧指令値とアーム電流の瞬時値を用いて重畳可能な補償電圧を演算し、各セルの補償電圧指令値を決定する。その結果、従来法と異なり、全周波数成分を補償に用いることができる。理論検討および実機実験によって、提案制御が従来制御よりも 187% 大きな電力偏差を補償できることを確認した。

提案制御は従来制御に比較し、負の電力偏差に対する補償範囲が縮小している。そのため、アーム内に極端に大きな負の電力偏差が発生した場合は提案制御によって補償することはできないが、アーム内バランス制御を従来制御へ切り替えることによって電力偏差を補償することができる。今後は、負荷条件に応じて補償範囲を動的に変化させ、より広い電力偏差を補償できる手法について検討する。

文 献

- (1) G. Wang et al.: "A Review of Power Electronics for Grid Connection of Utility-Scale Battery Energy Storage Systems", IEEE Trans. Sustain. Energy, Vol. 7, No. 4, pp. 1778-1790 (2016)
- (2) V. Sridhar and S. Umashankar: "A Comprehensive Review on CHB MLI based PV Inverter and Feasibility Study of CHB MLI based PV-STATCOM", Renew. Sustain. Energy Rev., Vol. 78, pp. 138-156 (2017)
- (3) N. Kawakami, S. Ota, H. Kon, S. Konno, H. Akagi, H. Kobayashi, and N. Okada: "Development of a 500-kW Modular Multilevel Cascade Converter

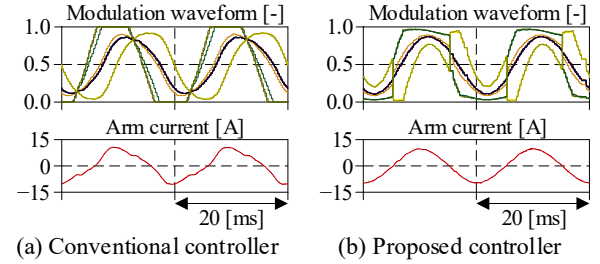


Fig. 7. Steady state operation of modulation waveforms and arm current of arm a,u with conventional and proposed method.

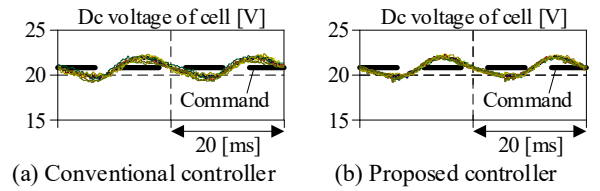


Fig. 8. Steady state operation of dc voltage of cells in arm a,u with conventional and proposed method.

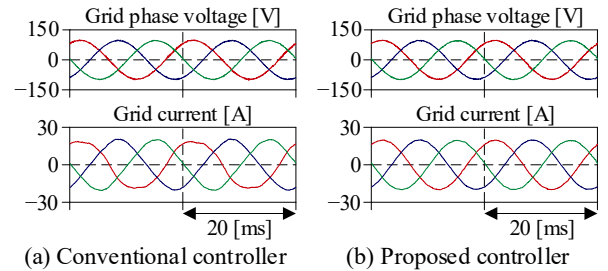


Fig. 9. Steady state operation of grid phase voltage and current with conventional and proposed method.

for Battery Energy Storage Systems", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 50, No. 6, pp. 3902-3910 (2014)

- (4) G. Guidi, S. D'Arco, K. Nishikawa, and J. A. Suul: "Load Balancing of a Modular Multilevel Grid Interface Converter for Transformer-Less Large-Scale Wireless Electric Vehicle Charging Infrastructure", IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron., (early access)
- (5) W. Zeng, R. Li, and X. Cai: "A New Hybrid Modular Multilevel Converter with Integrated Energy Storage", IEEE Access, Vol. 7, pp. 172981-172993 (2019)
- (6) 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)
- (7) T. Zhao et al.: "Harmonic Compensation Strategy for Extending the Operating Range of Cascaded H-Bridge PV Inverter", IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron., Vol. 8, No. 2, pp. 1341-1350 (2020)
- (8) Z. Wang, H. Lin, and Y. Ma: "Improved Capacitor Voltage Balancing Control for Multimode Operation of Modular Multilevel Converter with Integrated Battery Energy Storage System", IET Power Electron., Vol. 12, No. 1, pp. 2751-2760 (2019)
- (9) Y. Su, P. Wu, and P. Cheng: "Design and Evaluation of a Control Scheme for the Hybrid Cascaded Converter in Grid Applications", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 35, No. 3, pp. 3139-3147 (2020)
- (10) S. Yang et al.: "Quantitative Comparison and Analysis of Different Power Routing Methods for Single-Phase Cascaded H-Bridge Photovoltaic Grid-Connected Inverter", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 36, No. 4, pp. 4134-4152 (2021)