

MMC を用いたマルチポートコンバータの アーム内電力偏差補償時の循環電流低減法

安田 匠*, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Reduction of Circulating Current for Intra-Arm Power Unbalance in Multiport Converter based on MMC
Takumi Yasuda, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1. まえがき

近年、モジュラーマルチレベル変換器(MMC)の構成を利用したマルチポートコンバータが提案されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。本回路は、1アーム内セル間の電力偏差の補償範囲に制約があり、補償範囲を拡大するため追加の循環電流(以下、アーム内バランス電流)を重畳する方式が提案されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、従来の方式はオフラインでアーム内バランス電流を計算しており、各セルの負荷変動への対応が困難である。本報告では、負荷変動に対応可能なアーム内バランス電流制御を提案する。提案制御では、二分法を用いて電力偏差の補償に必要なアーム内バランス電流を最小化する。

2. アーム内バランス制御

図1のマルチポートコンバータでは、各セルに状態の異なる負荷もしくは電源が接続される。システムの入出力電力およびアーム間電力偏差は従来のMMCと同様の制御によって制御する⁽²⁾。

図2に提案するアーム内バランス制御を示す。アーム内バランス制御は、補償電圧によって電力偏差を補償する補償電圧生成部と補償範囲を拡大するためのアーム内バランス電流重畳部で構成される。

図3にセル電圧波形を示す。セル電圧はセル数 N で除したアーム電圧と補償電圧の和となる。そのため、補償電圧の最大値は $V_c - v_{arm}(t)/N$ 、最小値は $-v_{arm}(t)/N$ までに制限される。つまり、瞬時補償電力の理論最大値は(1)式に得られる。

$$P_{\delta,max,th}(t) = \max \left[-\frac{v_{arm}(t)}{N} i_{arm}(t), \left(V_{c,k} - \frac{v_{arm}(t)}{N} \right) i_{arm}(t) \right]. \quad (1)$$

同様に、瞬時補償電力の理論最小値 $p_{\delta,min,th}(t)$ が得られる。つまり、任意のアーム電流 $i_{arm}(t)$ に対して $p_{\delta,max,th}(t)$ 、 $p_{\delta,min,th}(t)$ を実現する基準波形 $g(t)$ を設定することで、過変調せずに補償可能な電力範囲を最大化できる。しかし、基準波形 $g(t)$ は1つであるため、自由度の観点から $p_{\delta,max,th}(t)$ と $p_{\delta,min,th}(t)$ の両者を同時に実現可能な基準波形 $g(t)$ は存在しない。言い換えると、基準波形 $g(t)$ による補償範囲 $p_{\delta,max}(t)$ 、 $p_{\delta,min}(t)$ の片方もしくは両者が理論値 $p_{\delta,max,th}(t)$ 、 $p_{\delta,min,th}(t)$ よりも小さい必要がある。そこで、提案法では、(2)式に示すようにセルの電力条件に応じて補償範囲を変化させる。

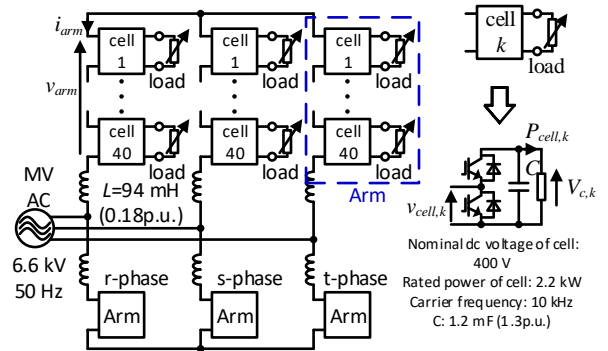


Fig. 1. Multiport converter with cascaded-chopper cells.

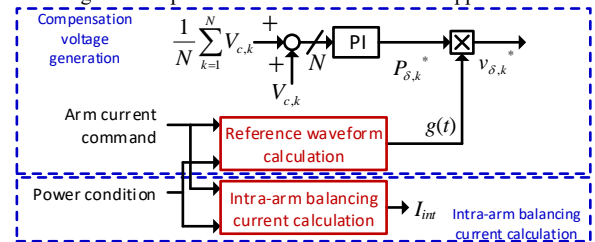


Fig. 2. Intra-arm balancing controller.

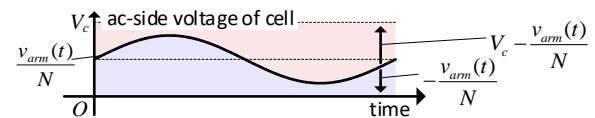


Fig. 3. Available voltage for intra-arm balancing controller.

$$P_{\delta,max}(t) : P_{\delta,min}(t) = \max_{1 \leq k \leq N} [P_{cell,k}] - \bar{P}_{cell} : \min_{1 \leq k \leq N} [P_{cell,k}] - \bar{P}_{cell}, \quad (2)$$

$P_{cell,k}$ はセル k の電力、 \bar{P}_{cell} はアーム内平均セル電力である。右辺はアーム内に発生している最大および最小電力偏差である。例えば、アーム内最大電力偏差が極端に大きいセルが存在する条件では、最小補償範囲を狭める一方で、最大補償範囲を増加させることで、大きな正の電力偏差を補償する。一方、補償電圧のみで電力偏差を補償できない場合、セルの過変調を防止するためにアーム内バランス電流 $i_{int}(t)$ を重畳する。 $i_{int}(t)$ が大きいほど補償範囲が拡大できるが、損失が増加する。そのため、 $i_{int}(t)$ は必要最小限にとどめる。

図4に、アーム内バランス電流計算のフローチャートを示す。提案方式では、補償可能範囲の計算値とアーム内セル間の電力不平衡の状態を比較することで、アーム内バランス電流 $i_{int}(t)$ を調整する。本制御の補償範囲は、 $i_{int}(t)$ を含めたアーム電流と過変調の境界条件における補償電圧の積を系統周期で時間積分することで得られるが、補償範囲は解

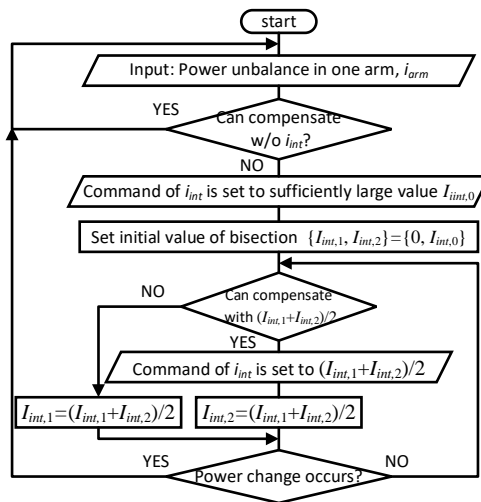


Fig. 4. Flowchart of online calculation of intra-arm balancing current.

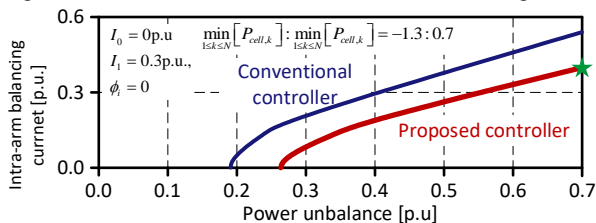


Fig. 5. Comparison of required intra-arm balancing current for compensation.

析的に求められないため、本方式では離散積分を用いて算出する。 $i_{int}(t)$ の振幅 I_{int} は二分法を用いて決定する。まず、二分法による演算遅れによる過変調を防止するため、 I_{int} の初期値として十分に大きな値を I_{int} の指令値とする。このとき、初期値はアーム電流が回路の定格電流を超えないように設定する。その後、二分法によって現在の I_{int} よりも小さな電流で補償可能である場合、演算した電流を適用する。二分法の演算を繰り返すことで、 I_{int} の最小値を導出する。なお、演算誤差による過変調を防止するため、 I_{int} の指令値は導出された値に対して10%だけ大きな値としている。

図5は、従来の補償電圧生成法⁽³⁾と提案する補償電圧生成法を適用した場合に、電力偏差の補償に必要なアーム内バランス電流 I_{int} である。本検証は次章のシミュレーション検証と同様の条件における比較であり、図中の星はシミュレーションにおけるアーム内電力偏差の条件を示している。従来制御では、アーム電流の符号 $\text{sgn}[i_{arm}(t)]$ を基準波形 $g(t)$ として用いている⁽³⁾。提案制御によって、必要となる I_{int} が減少している。電力偏差最大時(0.7p.u.)には、提案法は従来に比較して電流を26.2%減少できる。

3. シミュレーション検証

図1に検証条件を示す。本報告では、アーム内バランス電流を系統の2倍周波数成分の逆相成分の循環電流とした。また、図5に示したアーム内バランス電流生成部の実行周期は補償電圧生成部と干渉しないよう十分に低速の0.5sと

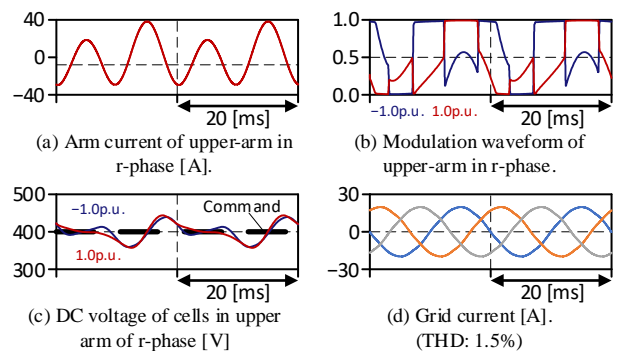


Fig. 6. Simulation result of steady-state operation under power unbalance.

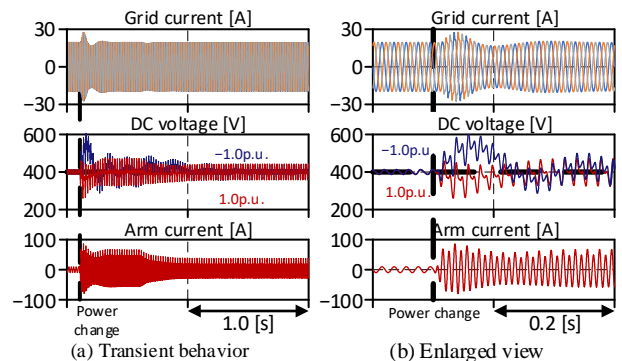


Fig. 7. Transient response under load change.

しており、電流指令値の急激な切り替わりを防止するため出力部にローパスフィルタを接続している。

図6に、同一アーム内に1p.u.および-1.0p.u.で動作するセルが同時に存在する場合の提案制御による定常動作波形を示す。図6(a)に示すアーム電流には、電力偏差を補償するためにアーム内バランス電流が重畳されている。図6(b)に示すセルの変調波は、ピークおよびボトム値が過変調の境界付近の値となっており、過変調は発生しない。その結果、図6(c)に示すように電力偏差を有する2セルの直流電圧は指令値である400Vに追従する。加えて、図6(d)に示すように三相平衡電流が得られている。

図7に電力の過渡偏差に対する動作を示す。電力変動前は、アーム内電力偏差が存在せず、アーム内バランス電流は流れない。電力変動後、セルの電力がそれぞれ1p.u.と-1p.u.に変化し、一時的にアーム内バランス電流が増加する。電力変動直後のアーム内バランス電流指令は36.3Aであるが、その後提案法によって電流は減少し、最終値は18.1Aとなり、理論値に対して8.7%大きい。これは、演算誤差に加えて、過変調防止のために電流指令値を10%だけ増加させたことが原因である。また、セルの直流電圧と系統電流はバランスすることを確認した。

文献

- (1) P. Sochor and H. Akagi, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 53, No. 5, pp. 4695-4707 (2017)
- (2) G. Guidi, et al., IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron., Vol. 9, No. 4, pp. 4587-4605 (2021)
- (3) W. Zeng, et al., IEEE Access, Vol. 7, pp. 172981-172993 (2019)