

電圧クランプ形双方向スイッチの 多段直列接続時における電圧バランス制御法

永吉 謙一*, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Voltage Balance Method of Serial Connected Voltage Clamped Bidirectional Switches.
Ken-ichi Nagayoshi, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

マトリックスコンバータの高耐圧化手法としてはトランスを用いる方式⁽¹⁾が存在するが、トランスは容積が大きく小型化の妨げとなる。そこで筆者らは電圧クランプ形双方向スイッチの直列接続による高耐圧化手法について検討を行ってきた。直列接続時の問題として、各スイッチのスイッチングタイミングのずれにより生ずる電圧アンバランス現象が挙げられるが、筆者らは2直列の場合について電圧バランス制御を提案し、実験により有用性を確認している⁽²⁾。

本稿では、それ以降の多段直列の場合における電圧バランス制御を提案し、4直列の場合についてシミュレーションによる解析および動作確認を行ったので報告する。

2. 交流スイッチの構成と直列接続時の

電圧アンバランス現象

図1に提案双方向スイッチの構成を示す。提案スイッチは2in1のIGBTモジュールとダイオードモジュールで構成可能である。また、提案スイッチは電圧クランプ形のスナバ回路を内蔵しており、これにより直列接続時の電圧分担が可能となる。直列接続時の制御法としては、同方向のスイッチを同タイミングでオン/オフすればよい。しかし実際には、デバイスやドライブ回路の特性の影響で、わずかにスイッチングタイミングがずれる場合がある。

図2は、オン/オフタイミングがずれた場合の影響について模式的に示したものである。図2(a)ではオフからオンへの移行時を示しており、SU1が先にオフすると、配線インダクタンスのエネルギーがSU1のみに印加され、SU1の電圧が上昇する。また図2(b)ではオフからオンへの移行時を示しており、SU1が先にオンすると、分担されていた印加電圧がSU2のみに印加され、SU2の電圧が上昇する。

3. 提案する電圧バランス制御法

上述の電圧アンバランスを解決する直接的な方法は、各スイッチのスイッチングタイミングを検出し、同タイミングに調節することである。しかし、スイッチングタイミングを検出するためには別サイクルで動作する制御系が別途必要となり、コストが増大する。そこで、筆者らは図2の

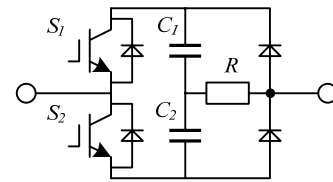


図1 提案双方向スイッチの構成
Fig.1. Configuration of the proposed bidirectional switch.

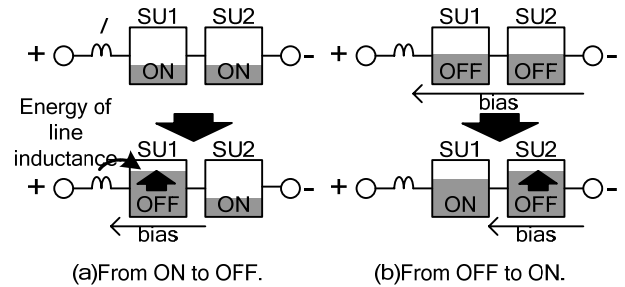


図2 直列接続間スイッチの電圧アンバランスの発生要因
Fig.2. Cause of the voltage unbalance between serial connected switches.

電圧アンバランス現象を利用し、電圧が低くなった方のスイッチをわざと図2(a)(b)のタイミングでスイッチングすることで電圧のバランス化を行うバランス制御を提案し、2直列の場合においてマトリックスコンバータを用いた実験で有用性を確認している。提案方式は制御サイクル時に各スイッチの電圧を検出すればよく、別サイクルで動作する制御系が必要ない。この概念を3直列以上の場合に適用するため、予め遅延時間 T_{ajst} を設定しておき、電圧の大きいスイッチが図2のスイッチングタイミングとならないよう電圧の大きさ順に T_{ajst} ずつ遅延を設ける方式を提案する。

図3は提案電圧バランス制御のスイッチングシーケンスを示している。各直列スイッチの電圧関係は $V_{SU1} > V_{SU2} > V_{SU3} > V_{SU4}$ とする。図3(a)はオフからオンへの制御タイミングを示しており、一番電圧の大きいSU1から順番にSU4までオンすることで電圧の大きいスイッチのオンタイミングが遅れるのを防ぐ。また、図3(b)はオンからオフへの制御タイミングを示しており、一番電圧の小さいSU4から順番にオフすることで電圧の大きいスイッチのオフタイミングが早まるのを防ぐ。提案バランス制御は検出した電圧順に遅延を付加するだけでよいので、簡単に制御可能である。

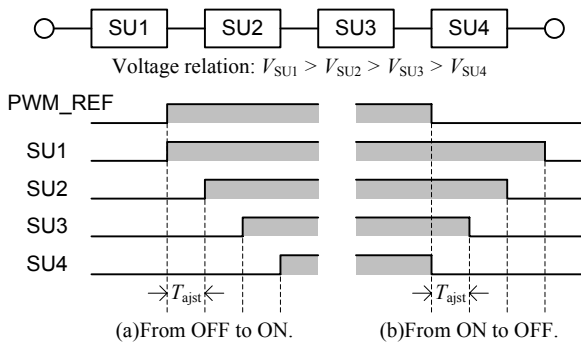


図3 提案電圧バランス制御のスイッチングシーケンス
Fig.3. Switching sequence of the proposed balance control.

4. シミュレーションを用いた検証

提案バランス制御をシミュレーションにおいてマトリックスコンバータに適用し、動作検証を行った。

図4にシミュレーション回路、図5にシミュレーション波形を示す。なお、ここでは電圧バランスが発生するように各スイッチングタイミングにわざと遅延時間を設けている。図5より、制御前ではアンバランスを生じていた電圧が制御を適用するとバランスしており、提案バランス制御が動作していることがわかる。ここで、図5より制御を適用してから電圧が収束するまで時間を要していることがわかる。この収束時間と収束電圧が T_{ajst} の変化によりどのように変化するか調査した。

図6に制御特性試験シミュレーション回路を示す。回路は直流降圧チョップを用い、各スイッチの遅延時間は前述のシミュレーション時と同様とした。計測方法として、まず制御を適用しない状態で動作させてアンバランス現象を生じさせ、そこにバランス制御を適用し、電圧が収束するまでの時間と収束後の最大電圧を計測した。

図7に計測した制御特性を示す。なお、 $T_{ajst} = 50[\text{ns}]$ 時にはスイッチ電圧がほとんど収束しなかったため、電圧が大きくなった。それ以外においては、 T_{ajst} を増加させると収束時間が減少するが、収束電圧が増加することがわかる。これは、調整時間を増やすことで偏差が大きくなるためである。収束電圧が大きくなると同等の耐電圧を得るためにスイッチ段数を増やす必要がある。また、 $T_{ajst} = 100[\text{ns}]$ 時には収束時間が長くなっている。収束時間が長くなると、スイッチ電圧は電源電圧や負荷電流によって変動するので制御が追従できなくなる。以上より、収束時間はスイッチ電圧の変動に追従可能な最低限の値を選択し、収束電圧を可能な限り低減する T_{ajst} を設定するのが望ましい。

5. まとめ

本論文では、多段直列接続に適用可能な電圧アンバランス制御を提案し、シミュレーションにおいて有用性を確認した。また、調整時間 T_{ajst} の量によって変化する収束時間と収束電圧について調査を行った。その結果、 T_{ajst} を増加さ

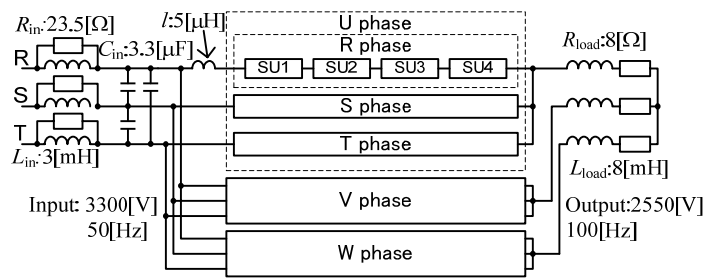


図4 シミュレーション回路
Fig.4. Simulation circuit.

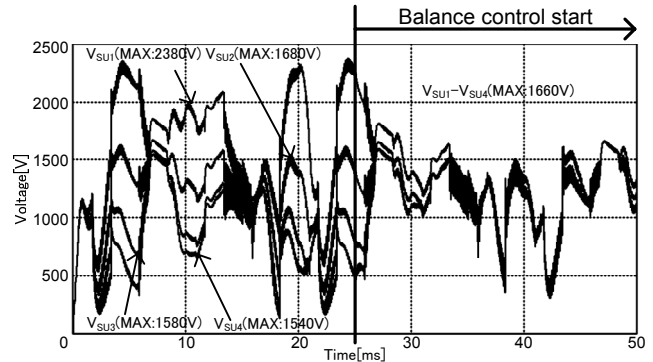


図5 シミュレーション結果
Fig.5. Simulation result.

(Signal delay SU1: 0s, SU2: 0.12 μ s, SU3: 0.24 μ s, SU4: 0.36 μ s, T_{ajst} : 0.1 μ s)

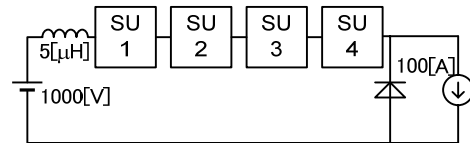


図6 制御特性試験シミュレーション回路
Fig.6. Simulation circuit of control characteristics.

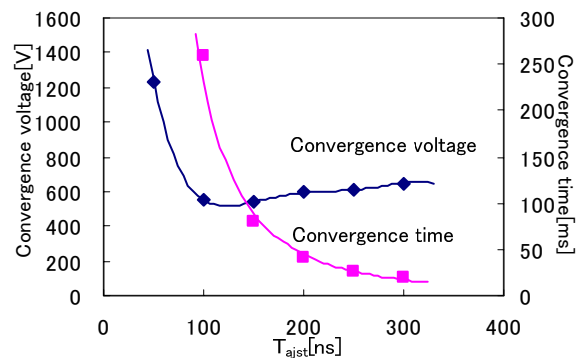


図7 T_{ajst} -収束時間、収束電圧特性

Fig.7. Characteristics of T_{ajst} v.s. convergence time and voltage.

せると収束時間は減少するが収束電圧が増加する現象を確認した。したがって、 T_{ajst} は収束時間を最低限とし、可能な限り最大電圧を小さく設定するのが望ましい。なお、本研究は平成17年度産業技術研究助成事業の支援を受けており、関係各位に感謝の意を表します。

文献

- (1)上田, 池田他, 平成19年電気学会全国大会, 4-103(2007)
- (2)永吉, 伊東, 半導体電力変換研究会, SPC-08-14(2008)