

汎用パワーモジュールと回生可能なパッシブスナバを用いた交流スイッチの設計法

Proposal of Bi-directional Switch using General-purpose Power Module with Regenerative Passive Snubber

永吉 謙一*, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Ken-ichi Nagayoshi, Jun-ichi Itoh(Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

AC/AC直接変換を実現するためには双方向の電力を制御できる交流スイッチが必要である。しかし、現在開発されている逆阻止IGBTは容量が小さく、大容量化するには従来素子を組み合わせたスイッチが必要となる。一方、AC/AC直接変換器では、サージからパルスデバイスを保護するために、図1のようなクランプ回路を必要とする。しかしクランプ回路は吸収エネルギーを全て抵抗で消費するため損失増加の原因となる。回生を行う場合はスイッチ数が増加するなどコストアップの原因となる⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

そこで本論文では、汎用パワーモジュールと回生が可能なスナバ回路を有する交流スイッチを提案し、その有用性について検証する。提案スイッチは汎用の2in1パワーモジュールを用いるため安価であり、また各方向につき制御するスイッチング素子は1個だけなので、制御も簡単である。さらに提案スイッチのスナバは、設計次第でクランプ回路にも回生スナバにもなる。

2.1. 構成と制御法

図2は提案する交流スイッチ及びスナバの回路図である。このスイッチは2in1のIGBTモジュール及びダイオードモジュールで構成され、スナバは直列接続された2つのコンデンサ C_1, C_2 と、コンデンサの midpoint に接続された抵抗 R で構成される。

図3に示す動作原理図を用いて提案回路の動作を説明する。動作を簡単に説明するため、ここでは電源は直流電圧源とする。 l は配線インダクタンスである。提案スイッチは回生を行うため S_1 と S_2 がトグル動作を行う。詳細を以下に示す。

S_2 を流れていた電流は S_2 をOFFすることにより S_1 のFWDへ転流し、 L にたくわえられたエネルギーは図中1.の経路でスナバ回路に吸収される。次に S_1 をONすると、 C_1 の電位 $V_{C1} > E$ の時、 $V_{C1} = E$ となるまでコンデンサのエネルギーは図中2.の経路で電源へ回生される。また C_2 のエネルギーは、再び S_2 をONした時に図中3.の経路を通ることで、負荷に供給される。なお、2.と3.の経路を通る際にスナバ抵抗 R で消費する電力が、スナバのロスとなる。

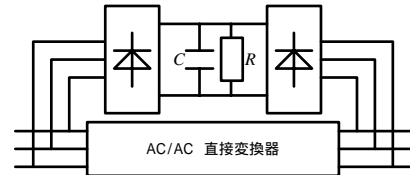


図1 ダイオードクランプ回路
Fig. 1. Diode clamp circuit.

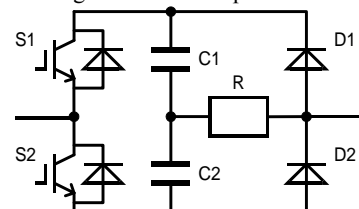


図2 提案交流スイッチ
Fig. 2. Proposed switch circuit.

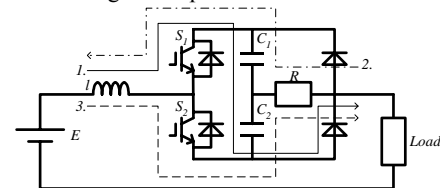


図3 スwitchの動作原理
Fig. 3. Principle of operation of switch.

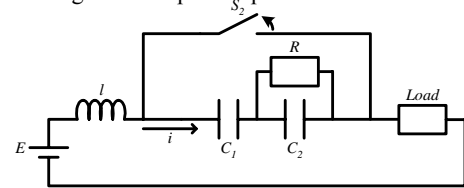


図4 サージ吸収時の等価回路
Fig.4. Equivalent circuit when surge energy is absorbed.

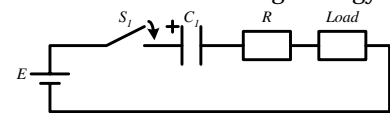


図5 回生時の等価回路
Fig.5. Equivalent circuit when surge energy is regenerated.

2.2. スナバの設計法

A. C_1, C_2 の設計法

図4にサージ吸収時の等価回路を示す。スナバの吸収エネルギーは次式で表される。

$$\frac{1}{2}(C_1 \cdot \Delta v_1^2 + C_2 \cdot \Delta v_2^2) + R \cdot i_R^2 \quad (1)$$

なお、 v_1 、 v_2 はサージ吸収による C_1 、 C_2 の上昇分電圧で、スイッチの耐圧を考慮して決定する。また、 i_R は抵抗に流れる電流の平均値である。サージエネルギーを吸収する時、吸収後の C_1 、 C_2 の電圧の合計がスイッチの耐圧を超えないように C_1 、 C_2 を設計しなければならない。すなわちこの(1)式で表されるサージ吸収エネルギーがインダクタンスに蓄えられるサージエネルギーを上回るようにコンデンサの容量を設定する。ここで、 $C_1=C_2=C$ とし、さらに R の影響を無視すると $v_1=v_2=v$ と簡単化され、

$$\frac{1}{2}C \cdot \Delta v^2 \geq \frac{1}{2}L \cdot i^2 \quad (2)$$

すなわち、コンデンサの容量は(2)式を変形して

$$C \geq \frac{L \cdot i^2}{\Delta v^2} \quad (3)$$

を満たすように決定すれば良い。ただし、これはコンデンサ1個についての式であり、実際にはスイッチング素子に2 v の電圧が加わるので、注意が必要である。

B. R の設計法

図5は放電中の等価回路であり、回路方程式は

$$v_{C1} = E + (v_{C10} - E)e^{-\frac{t}{(R+Load)C}} \quad (4)$$

となる。ここで v_{C1} は C_1 の電圧、 v_{C10} は放電前の C_1 の電圧である。 C_2 においても同様の等価回路を描くことができる。 R の値は、 C の電圧が最大許容電圧である時、放電電圧がサージ吸収による上昇電圧を下回らないよう設定する必要があるから、(4)式の v_{C10} を最大許容電圧とし、

$$v_{C10} - v_{C1} \geq \Delta v \quad (5)$$

を満たすよう設定する。

3. 交流チョッパへの適用

図6は提案スイッチの有用性を検証するために構成した交流チョッパである。実験装置のパラメータを表1に示す。実験では S_1 、 S_2 においてはRCのパラメータを小さく、 S_3 、 S_4 については大きくパラメータを設定した。図7に測定結果を示す。それぞれ、 C_1 と C_2 の合計電圧 v_{C1C2} 、 C_3 と C_4 の合計電圧 v_{C3C4} 、負荷電流波形 i_{load} である。波形より、パラメータを小さく設定した S_1 、 S_2 側のコンデンサ電圧 v_{C1C2} は再生動作を行い、 S_3 、 S_4 側のコンデンサ電圧 v_{C3C4} はクランプ動作を行っていることがわかる。

一方、図1のような従来のクランプ回路についても同程度のサージ電圧(200V)になる条件で損失を計測した。表2は損失の比較結果である。従来のクランプ回路に比べて提案スナバのロスとは約25%低減されていることが確認できる。

4. まとめ

本論文では、汎用パワーモジュールと構造が簡単な再生スナバを組み合わせた交流スイッチを提案し、実験により損失提言を確認し、その有用性を検証した。今後、マトリクスコンバータをはじめとするAC/AC直接変換器への応用が期待される。

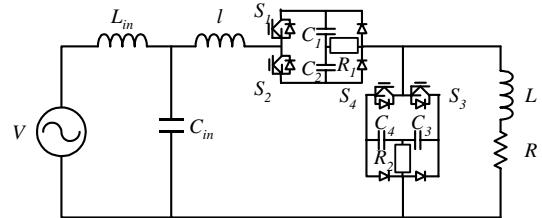


図6 実験回路

Fig.6. Experimental circuit.

表1 実験装置のパラメータ

Table 1. Parameters of experimental system.

| | | |
|------------------|-------------|----------|
| Input LC Filter | L_i | 2[mH] |
| | C_i | 3.3[μF] |
| Inductance | l | 10[μF] |
| | | |
| Proposed Snubber | $C_1=C_2$ | 0.3[μF] |
| | R_1 | 11.75[Ω] |
| | $C_3=C_4$ | 3.3[μF] |
| | R_2 | 18.8[kΩ] |
| Load | L | 18[mH] |
| | R | 8[Ω] |
| Clamp Parameter | C_{clamp} | 103[μF] |
| | R_{clamp} | 9.4[kΩ] |

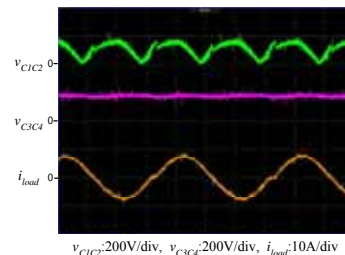


図7 実験結果

Fig.7. Experimental results.

表2 損失の比較

Table 2. Comparison of loss.

| | Clamp Circuit | Proposed Snubber |
|---------|---------------|------------------|
| Loss[W] | 4.23 | 3.18 |

文献

- (1) Peter Nielsen, Frede Blaabjerg, John K. Pedersen: "New Protection Issues of a Matrix Converter: Design Considerations for Adjustable-Speed Drives", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 35, 5, 1150-1161 (1999).
- (2) 三野 和明・大熊 康浩・黒木 一男:「双方向スイッチ回路を用いた直接リンク形変換回路の基本動作」, 電学論D, Vol. 118, No.2, pp.236-242(1998) .
- (3) 高久 拓, 磯部 高範, 鳴島 じゅん, 筒井 広明, 嶋田 隆一: "磁気エネルギーを蓄積再生する電流スイッチによる力率改善", 電学論D, Vol. 125, No. 4, pp.372-377 (2005) .