

DEVELOPMENT OF A HIGH POWER NPC INVERTER

Kunio KOSEKI^{A)}, Yoshinori KURIMOTO^{B)}, Yuichi MORITA^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization, Institute of Particle and Nuclear Studies,
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization, Accelerator Laboratory
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract (英語)

It has been widely reported that the Common-Mode-Current disturbs a stable operation in various accelerator complex. The reason why we have such an undesired noise current is that, in an inverter circuit, the potential of neutral point will be fluctuated between high-voltage to ground-potential during each switching modes. In the Neutral-Point-Clamped (NPC) inverters, on the other hands, the neutral point of output terminals can be always clamped to the ground-potential if we chose a proper switching algorism. So that no voltage will be applied across the neutral-point and the ground potential. This is the reason why we have initiated a development of the NPC inverter to apply it into the accelerator complex.

In an inverter circuit, undesirable surge voltage will be applied during its switching period. This surge voltage exceeds the maximum rating of an IGBT in worst case. Moreover, the surge voltage will increase the switching loss in devices. It is important to reduce this surge voltage to secure a stable operation of the inverter circuit. Details of our approach to minimize the surge voltage and the operational results of a developed NPC inverter are reviewed in this article.

大電力 NPC インバータの開発

1. はじめに

現在 J-PARC[1]では MW クラスの大強度化を目指し様々な研究開発を行っている。とりわけ電磁石電源では、1) 高繰り返し運転に耐え得る大電力(高電圧)出力及び、2) 遅い取り出しに対応した超低ノイズ出力の各々を両立する電源装置の開発が喫緊の課題となっている。

電磁石電源等の高精度な制御を要求される電源装置では装置から発生する不要なノイズ成分を極力除去する事が望ましい。NPC インバータではスイッチングモードを適切に選択する事で中性点電位を常にグラウンド電位にクランプさせる事が可能となり、原理的にコモンモードノイズを発生させない運転が可能となる[2-6]。現在までに IGBT を用いた NPC インバータを加速器電源に適用した例はなく、高エネルギー加速器研究機構では先行して開発を進めている。J-PARC 主リング電磁石用電源として NPC インバータを適用する場合、大きく分けて 2 種類のインバータユニットが必要となる。1つは偏向電磁石や大型の四極電磁石用の高電圧(最大充電電圧 4kV)タイプと小型の四極電磁石や 6 極電磁石用の低電圧(最大充電電圧 2kV)タイプである。今回開発を行った低電圧タイプのインバータの基本仕様を表 1 に纏める。

表 1 新規開発した NPC インバータの基本仕様

充電電圧	2 kV
定格電流	300Arm
最大出力電力	500 kVA
スイッチング周波数	5 kHz
スイッチング素子(IGBT)	CM1000DUC-34NF
IGBT 定格電圧	1700V
IGBT 定格電流	1000A

また NPC インバータの概略回路構成を図 1 に示す。

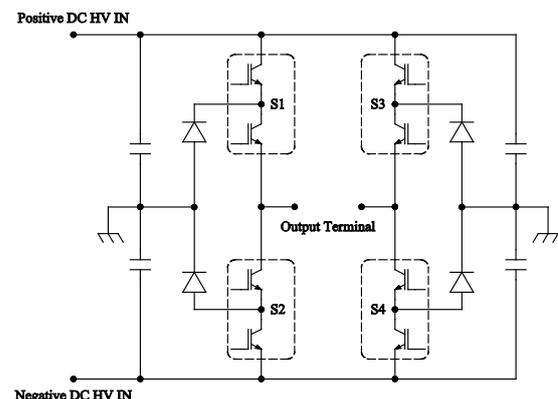


図 1 NPC インバータの回路構成

2. スイッチングサージの発生メカニズム

インバータ装置内ではスイッチング毎に電流の遮断及び転流を繰り返す。電流の遮断された経路では、配線等の持つ寄生インダクタンスに蓄えられたエネルギーによって IGBT に振動電圧（サージ電圧）を発生させ、場合によっては半導体素子の定格電圧を上回り破壊に至る[7]。サージ電圧の振幅は電流の流れる一巡ループインダクタンスによって決定され、下記の式で表現される。ここで V_c はコンデンサバンク電圧、 L は一巡ループインダクタンスである。

$$V = V_c + L \frac{dI}{dt} \quad (\text{式 1})$$

つまり力行又は再生動作時に形成される電流ループ内に存在する寄生インダクタンスを低減する事が、電流遮断サージを低減する上で非常に重要となる。そこで、1) コンデンサの低インダクタンス化と2) 配線の持つ寄生インダクタンスの低減がスイッチング時に発生するサージ電圧を抑制し、インバータ装置を安定に動作させる上で重要となる。

3. 低インダクタンスコンデンサ

3.1 フィルムコンデンサの内部構造

現在開発を進めている大電力 NPC インバータではその難燃性等の理由から乾式（エポキシモールド）コンデンサを採用している。厚み数 μm のポリプロピレンフィルム上にアルミニウムを蒸着させる事により電極を形成した金属化フィルム 2 組を重ね合わせながら巻き取る事でコンデンサが形成される。各電極の端面に亜鉛等を溶射する事により取り出し電極（メタリコン）として利用する事が可能となる。モールドコンデンサ内部では複数の単位コンデンサが直並列に接続され外部端子へ接続される。その際、各単位コンデンサ間や外部端子への配線方法によってコンデンサの内部インダクタンス（寄生インダクタンス）が決定される。前述の通りコンデンサに大きな内部インダクタンスが存在すると、電流遮断時（IGBT オフ時）にサージ電圧が発生するため、低インダクタンス化が望まれる。

3.2 コンデンサの低インダクタンス化

既存のフィルムコンデンサでは必ずしも内部構造の最適化が出来ているとは言えず、全面的に設計

表 2 フィルムコンデンサの比較

	従来品	新規開発品
静電容量	1 mF	1 mF
定格電圧	2 kV	2 kV
定格電流 @ 5kHz	100 Arms	300 Arms
インダクタンス	65 nH	29 nH
期待寿命	150,000 H	150,000 H

を見直す事で低インダクタンス化を行った。新規開発したフィルムコンデンサと従来品との比較を表 2 に纏める。内部構造の最適化により従来品の 65nH に対して 29nH にまでインダクタンスの低減に成功した。

4. 構造設計

一般的なインバータ装置の構造設計では力行時に同時に導通すべき S1 及び S4 が対角の位置に配置され（図 1 参照）、これによる一巡ループインダクタンスが大きくなる。これを避けるため今回開発したインバータでは S1 及び S4 を各々隣り合わせに配置した（図 2 及び図 3 参照）。

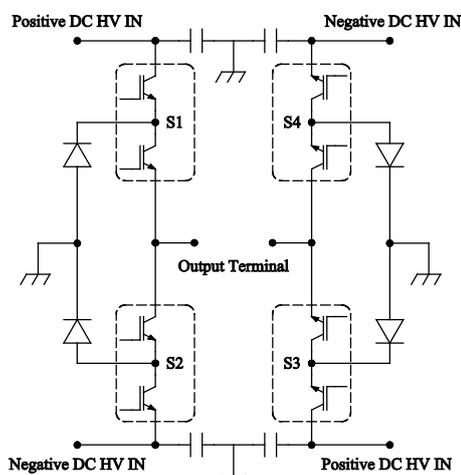


図 2 開発したインバータの回路構成

また図 3 から分かるように、コンデンサと IGBT とを接続する銅板は力行時の一巡ループを最小限にするため、最適化設計を行った。

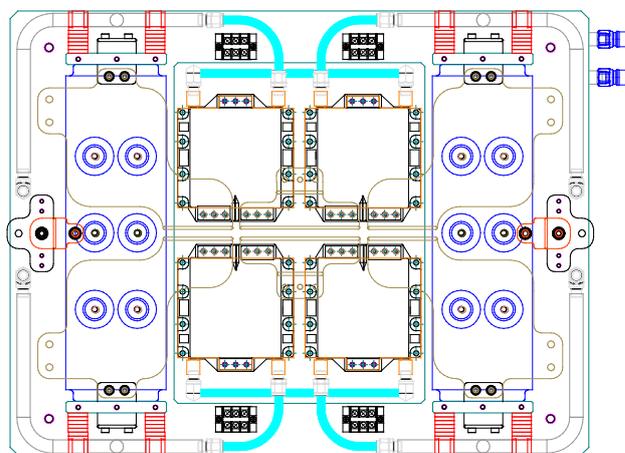


図 3 開発したインバータの構造図。左右に2台の低インダクタンスコンデンサを配置し、力行及び再生時の一巡ループインダクタンスを低減した。



図 4 新規開発した NPC インバータの写真

5. 電力試験

今回開発した NPC インバータの信頼性を検証するため模擬負荷において電力試験を行い、サージ測定を行った。充電電圧 1600V、出力電流 300A において IGBT によって電流遮断したタイミングにおけるスイッチング波形（赤；コレクタ～エミッタ間電圧、青；コレクタ電流）を図 5 に示す。なおこの時の出力電力は 300kVA であった。

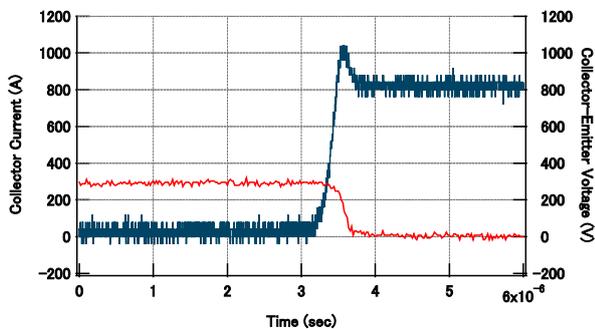


図 5 通電 300A（赤）における電流遮断（IGBT ターンオフ）時に印加されるコレクタ～エミッタ間電圧（青）。

IGBT の定格電圧 1700V に対して、サージ電圧も含めて印加される電圧値は 1000V 程度となっており、十分な余裕があると言える。

今回開発した NPC インバータを J-PARC 主リング電磁石へ適用しパターン通電を行った場合に予測される IGBT 内部での損失時間変化を図 7 に示す。最大発熱量は約 800W と予測された。使用している IGBT の熱抵抗がヒートシンクも含めて最大 35K/kW であることから、予想される温度上昇は 28K である。冷却水の入水温度を考慮にいれても接合温度が絶対最大定格の 150℃を超える事は無く、十分な安定な動作が可能であると言える。また、IGBT 素子内部で使用されている個々の部品の熱拡散係数の差異によるパターン通電における繰り返し応力につ

いても温度上昇が 30K 以下である事から問題にはならないと考えている。

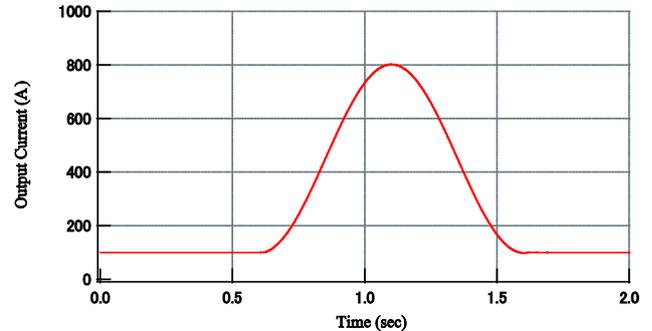


図 6 ロスの時間変化を算出する際に想定した電流パターン

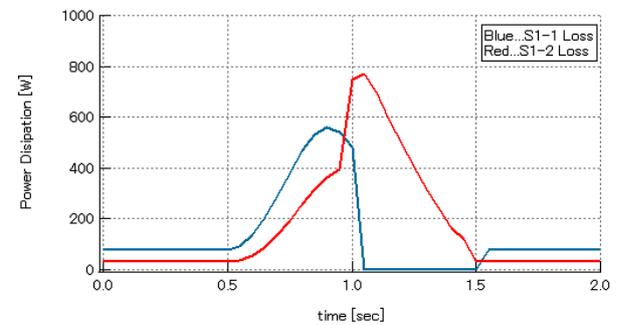


図 7 パターン通電で予測される損失。S1-1（青）は力行動作時のみ電流が流れるので回生動作時には損失は発生しない。S1-2（赤）は力行及び回生動作双方で使用されるので、ロスの時間分布が広がっている。

6. まとめ

最大充電電圧 2000V、平均出力電流 300A の大電力 NPC インバータを開発した。模擬負荷において 300kVA の出力試験を行った結果、IGBT に印加されるサージ電圧は定格電圧よりも十分低く、またスイッチング及び導通損失から予測される素子内部での温度上昇も問題ない事が分かった。今後 J-PARC 主リング電磁石への励磁試験に使用し、耐久性等の検証を行う予定である。

また J-PARC 主リングにおいて高繰り返し化を達成するためには高電圧出力のインバータは必須であり、高電圧出力においてもノイズの発生を抑えた 4kV 充電 NPC インバータの開発を順次行ってゆく予定である。

謝辞

本研究を遂行するに当たり予算等様々な面で支援頂いた高エネルギー加速器研究機構、加速器研究施設主幹・内藤富士雄氏に感謝申し上げます。

また、低インダクタンスコンデンサの開発を快諾

下さり、全面的に協力して下さった株式会社指月電機製作所・藤原健吾執行役、九州指月株式会社・秋月一紀部長及び株式会社指月電機製作所・西村大営業所所長に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] “Accelerator Technical Design Report for J-PARC”, KEK Report 2002-13, (2003).
- [2] Y. Kurimoto, et al., “A COMMON MODE-LESS POWER SUPPLY OPERATION WITH NPC INVERTERS”, 第9回日本加速器学会年会, Osaka, Aug. 8-11, 2012
- [3] H. Zhang, “Multilevel Inverter Modulation Schemes to Eliminate Common-Mode Voltage”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 36, NO. 6, NOVEMBER/DECEMBER 2000
- [4] H. Kim, et al., “A New PWM Strategy for Common-Mode Voltage Reduction in Neutral-Point-Clamped Inverter-Fed AC Motor Drives”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 37, NO. 6, NOVEMBER/DECEMBER 2001
- [5] Y. Lai, “Optimal Common-Mode Voltage Reduction PWM Technique for Inverter Control With Consideration of the Dead-Time Effects-Part I: Basic Development”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 40, NO. 6, NOVEMBER/DECEMBER 2004
- [6] A. Videt, “A New Carrier-Based PWM Providing Common-Mode-Current Reduction and DC-Bus Balancing for Three-Level Inverters”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 54, NO. 6, NOVEMBER/DECEMBER 2007
- [7] M. Soda , et al., “風力発電用大容量変換器の開発”, パワーエレクトロニクス学会誌, Vol 35 (2010.3)