

SuperKEKB ビームエキサイト用バーティカルキッカー VERTICAL KICKERS FOR SuperKEKB BEAM EXCITATION

内藤孝[#], 小玉恒太

Takashi Naito[#], Kota Kodama

KEK, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

In the SuperKEKB operation, a device is needed to excite the circulating beam to understand the ring's characteristics. SuperKEKB has kickers for horizontal excitation, but not for vertical excitation. The maximum excitation angle is about $50 \mu\text{rad}$. The existing kicker magnets are used, and new small pulsed power supplies using thyristor switches are developed. This small pulsed power supply is optimized for the kicker magnet inductance and which has the advantage of being able to switch between \pm -polarity. This report describes the current status of its development.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器は 7 GeV(HER)/4 GeV(LER)の電子・陽電子コライダーであり運転開始以来、世界最高 Luminosity を更新し続け 2024 年 12 月には 5.1×10^{34} を記録した[1]。さらなる Luminosity 向上のために機器の調整が行われている。調整の中でリングのダイナミックアパーチャーや物理アパーチャーを知ることはコリメータ、六極マグネットなどの最適化のために重要な項目となる。ダイナミックアパーチャーや物理アパーチャーを知るために、周回中のビームにシングルキックを与えるキッカーが必要となる。ビームにシングルキックを与えることでビーム振動を含んだビームの振る舞いを測定することが出来る。水平方向の振動は入射キッカーを使用することで可能となるが、垂直方向のキッカーを新たに用意する必要がある。今回、既存のキッカーマグネット(Fig. 1)と新規に設計製作したパルス電源を用いたキッカーシステムを構築した。集中定数型のキッカーマグネットのパルスはコイルのインダクタンスとコンデンサーの容量によって決まるが、特にパルス幅に関しては伝送ケーブルのインダクタンスも含めたマグネットのインダクタンスによって決まる。ビームにシングルキックを与えるためにはキッカーパルスはビームの周回時間、SuperKEKB の場合 $10 \mu\text{s}$ の間にパルスはゼロに戻る必要がある。パルスのテイルが周回時間を超えてしまうと一度キックしたビームをもう一回キックすることになりパルス振幅に比例した振動が得られなくなってしまう。最適なパルス幅を生成させるためにシミュレーションによってインダクタンスとコンデンサー容量の最適値を求めた。

パルス電源は最大 $50 \mu\text{rad}$ のキックアングルを生成し、1%以下の最小ステップでキックアングルを調整する必要がある。必要な最大電流は HER の場合約 110 A になり、LER の場合約 55 A になる。このパルス電源にはサイリスタを用いた小型のパルス電源を設計製作した。サイリスタ回路はアバランシェスイッチのドライブ回路として開発したものをを用いた[2]。また、1台のパルス電源で \pm 両方向のキックを実現するために高電圧リレーを使った極性切替回路を付加した。

[#] takashi.naito@kek.jp



Figure 1: Pictures of the vertical kicker magnets for HER/LER.

2. 回路設計

2.1 波形シミュレーション

SuperKEKB の入射キッカーはサイラトロンスイッチを使用し、トンネル内に設置している[3]ことからケーブルインダクタンスの影響が少ないのに対し、今回製作したパルス電源は半導体を使用して製作することもあり、加速器トンネルから約 30 m 離れた電源室に設置することを想定した。LER/HER それぞれのキッカーマグネットは Table 1 に示すようにコイルのインダクタンスが違うためパルス電源から見るとパルスの応答が変わってしまい、電源の仕様を変える必要が出てくる。これを合わせるためにパルス電源とキッカーマグネットを繋ぐ同軸ケーブルの本数を変えて合計のインダクタンスを近い値にした。ケーブルとマグネットのインダクタンスはそれぞれ LER/HER で $20 \mu\text{H}$ と $19 \mu\text{H}$ となった。こうすることによって同じ仕様の電源をそれぞれのキッカーマグネットに使用することが出来る。

また、キッカーパルスは1周回時間以内にゼロに戻る必要がある。そのためパルステイルを含めたパルス幅は $10 \mu\text{s}$ 以内にすることが必要である。

これらの値を用いて回路シミュレーター[4]でパルス応答を計算した。インダクタンス $19 \mu\text{H}$ 、コンデンサー容量 25nF の場合のパルス応答を Fig. 2 に示す。5.6 kV 印加時にパルスのピークは 120 A が得られており、パルスのテイルは $10 \mu\text{s}$ 以内にゼロになっている。コンデンサーの

容量を減らせばパルス幅をさらに狭くすることは可能だが電流のピークが下がってしまうため、その場合、印加電圧を上げる必要がある。

	Coil Inductance	Cable Inductance	Total	Current for 50 μ rad kick
LER	16.7 μ H	3.625 μ H (2 Cable)	20 μ H	221A/4turn =55A
HER	10.8 μ H	7.85 μ H (1 Cable)	19 μ H	328A/3turn =110A

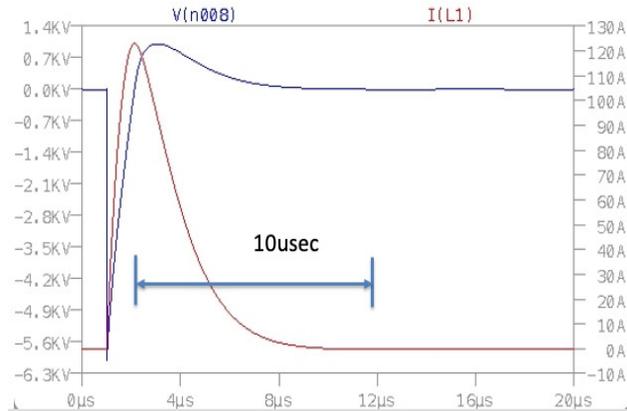


Figure 2: Simulation results of the kicker pulse, Red: Current waveform, Blue: Capacitance voltage. The pulse switch starts at 1 μ s and the pulse tail of the current reaches to zero before 10 μ s from the pulse peak.

2.2 サイリスタ回路

パルス生成のためのスイッチには MOS Gated サイリスタ (IXHX40N150V1HV) を用いた。サイリスタは耐圧 1500 V であり、5 段直列で 7.5 kV までスイッチすることが出来る。最大電流は 3.5 kA (10 μ s パルス時) であるため十分な性能を持つ。パルスの繰返しは 1 Hz 程度を想定しているため発熱の問題は考慮していない。このスイッチ回路は開発を進めているアバランシェスイッチのドライブ回路をベースにしており、設計時間を短縮することが出来た。パルス電源の回路を Fig. 3 に示す。回路はコンデンサーに蓄積された電荷をスイッチによって流すと、インダクタンスのマグネットにはマイナスの電圧が瞬時に発生し、LC の時定数に従った電流波形が現れる。

マッチング回路を入れることによって、逆方向の電流と振動は抑制されるためハーフサインに近い電流波形となる。マッチング回路はシミュレーションでパラメータを変えて最適値を求めた。

+/- 両極性のパルス生成を可能にするため高電圧リレー 4 個を用いて極性切替を行えるようにした。電流出力時に極性切替を行うとアーク放電が発生するため放電に耐えられるリレーを用意すると非常に大掛かりなものになってしまう。この問題を回避するために入力トリガー回路を工夫し、出力設定をゼロにした時のみリレーの切替を行うよう設計した。出力がゼロの時にのみ切替を行うよう

にすることで、小型のリレーを使用することが出来る。今回使用したリレーは 15 kV, 2 A (DC) のものでピーク電流 110 A であっても切替を行わなければ問題ない。このパルス電源の平均電流は約 1 mA となる。

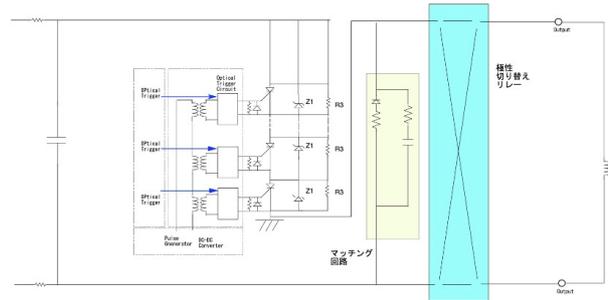


Figure 3: Circuit diagram of the kicker pulse source: The thyristor bank works as a high voltage switch. The kicker magnet shows as an inductance.

3. キッカーの性能

Figure 4 に製作したパルス電源とキッカーシステムの構成を示す。パルス電源は EIA4U のサイズに納まりコンパクトに製作することが出来る。全体の動作は Event receiver (EVR) で生成した 1 Hz トリガー信号を入力としてトリガー信号に同期したパルスを生成する。パルスと周囲ビームとのタイミングは EVR のディレイ機能で調節しパルスのピークにビームがくるように合わせる。設定電圧はネットワーク経由によりコマンドで設定した値が内部 DAC により設定される。DAC は 12 Bit の分解能を持つため十分 1% 以下の刻みで設定することが出来る。Figure 5a にテストスタンドで動作させた時の V-I peak 特性を示す。設定電圧に比例したパルスピークが得られており、5 kV 設

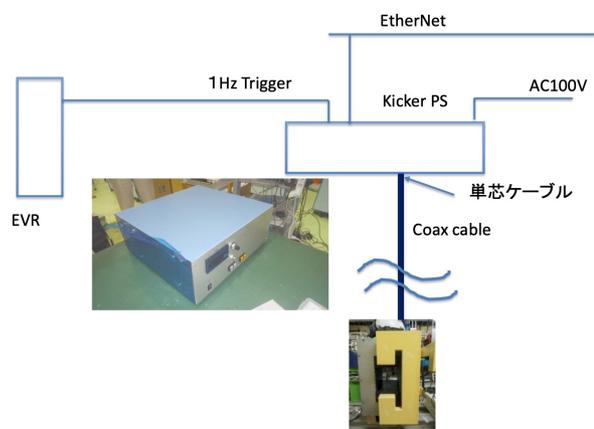


Figure 4: System configuration of the vertical kicker: The input trigger is generated by Event receiver (EVR). The EVR also make a delay time for adjusting the timing between the beam and the kicker pulse. The pulse amplitude set by the inside DAC, which has 12 bit resolution.

定時に 136 Apeak を測定した。テストスタンドでは負荷に 16 μH を使用したため出力は計算より大きく出ている。Figure 5b, 5c にトンネル内キッカーマグネットに接続した時の HER/LER の波形をそれぞれ示す。ほぼシミュレーション通りの波形が得られており、10 μs 以内にパルスはゼロになっている。

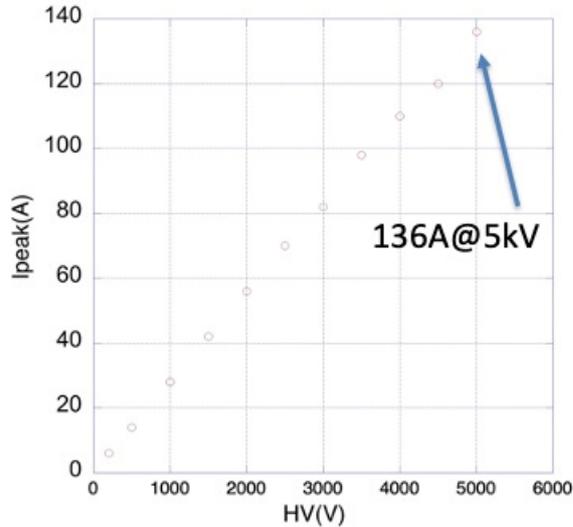


Figure 5a: The set voltage (HV) and the pulse current (Ipeak) characteristics : The linear function up to 136 A was measured.

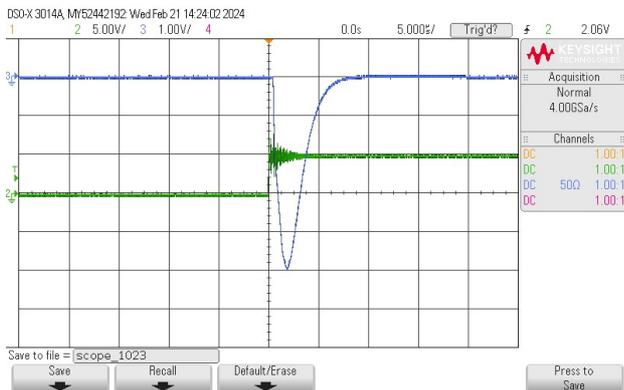


Figure 5b: Pulse waveform of the pulse current of HER: Green: Input trigger, Blue: pulse current. The peak current of the pulse is 100 A.

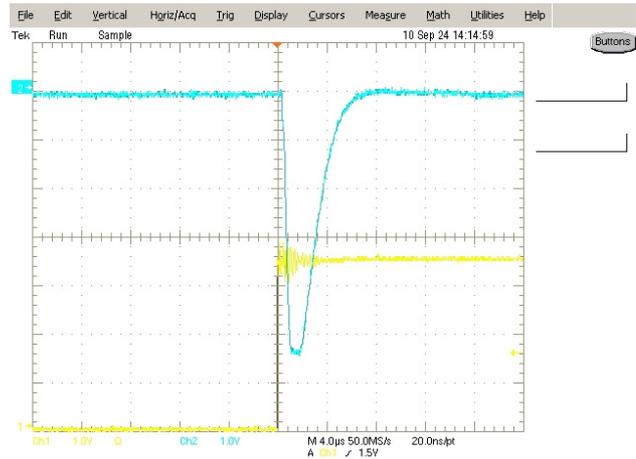


Figure 5c: Pulse waveform of the pulse current of LER: Yellow: Input trigger, Blue: pulse current. The peak current of the pulse is 55 A.

4. まとめ

ダイナミックアパーチャーや物理アパーチャーを測定するための垂直方向キッカーの設計製作を行った。HER/LER それぞれのキッカーマグネットは異なるインダクタンスであったため、伝送ケーブルの本数を調整してインダクタンスを 20 μH と 19 μH とした。パルス電源にはサイリスタスイッチを用いた回路を設計製作し、最大 50 μrad のキックアングルが得られる 110 A 以上のパルス出力を得た。パルス幅に関してはシミュレーションで得られたとほぼ同じ波形が得られており、設計通りの結果を得た。

謝辞

本研究は科研費 JP21K12527 の助成を受けたものです。本研究を支援していただきました小関施設長、柴田主幹、飛山主幹に感謝致します。

参考文献

- [1] <https://www.superkekb.kek.jp/>
- [2] T. Naito *et al.*, PASJ2020 FRPP47, Aug (2020).
- [3] KEK preprint 2001-157.
- [4] <https://www.analog.com/jp/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>