

副変換器をもつ対称化電源の 開発

中村 衆、山田 秀衛
高エネルギー加速器研究機構

吉野 達也、川崎 敦志
ニチコン草津(株)

2012/10/02
J-PARC/MR主電磁石電源レビュー

考慮する問題

- 電流パターン追従性

- 基準パターンに対する誤差はビーム入射のフラットボトムから加速ランプへの移行時および加速ランプからフラットトップへの移行時の過渡的な遅れ（ときには振動も含む）が問題となる。

- 運動量誤差

基準パターンで制御されている加速周波数との間に生じるトラッキング誤差によって、ビーム軌道が中心距離からずれるために運動量分散による軌道変動を生じる。

- ベータatronチューン誤差

四極電磁石と偏向電磁石との間に生じるトラッキング誤差によって、チューンが変動する。

- 電流リップル

- ビームに影響するのは磁場リップルであるため、電流リップルは数10kHz以下のものが問題となる。

- スイッチングリップル

可変直流電圧を作るための変換器が発生するスイッチングリップル。ほとんどの電磁石電源はPWM方式の変換器を用いているため、このPWMによるスイッチングリップルが有る。

- 整流リップル

三相交流とその整流に付随する商用周波数とその整数倍のリップル。

目標性能と対策

- 電流パターン追従性

- 電流フィードバックループについて、**1kHz程度の帯域**を目指す。

- 運動量誤差

リングの横方向アパーチャとも関係するが、運動量誤差による軌道変動がアパーチャ余裕以下となるようにする。

- ベータロンチューン誤差

チューンアパーチャの余裕と関係する。MRのチューンは約20であるので、 $\Delta v \approx \pm 0.0002$ 程度の余裕を考えると**トラッキング誤差は $\sim 1 \times 10^{-5}$ 以下**を目標とする。

- 電流リップル

- 三相交流の整流部でリップルを十分に低減する。遅いビーム取り出しのためには**10kHz以下のリップル率は 1×10^{-6} 以下**を目指す。

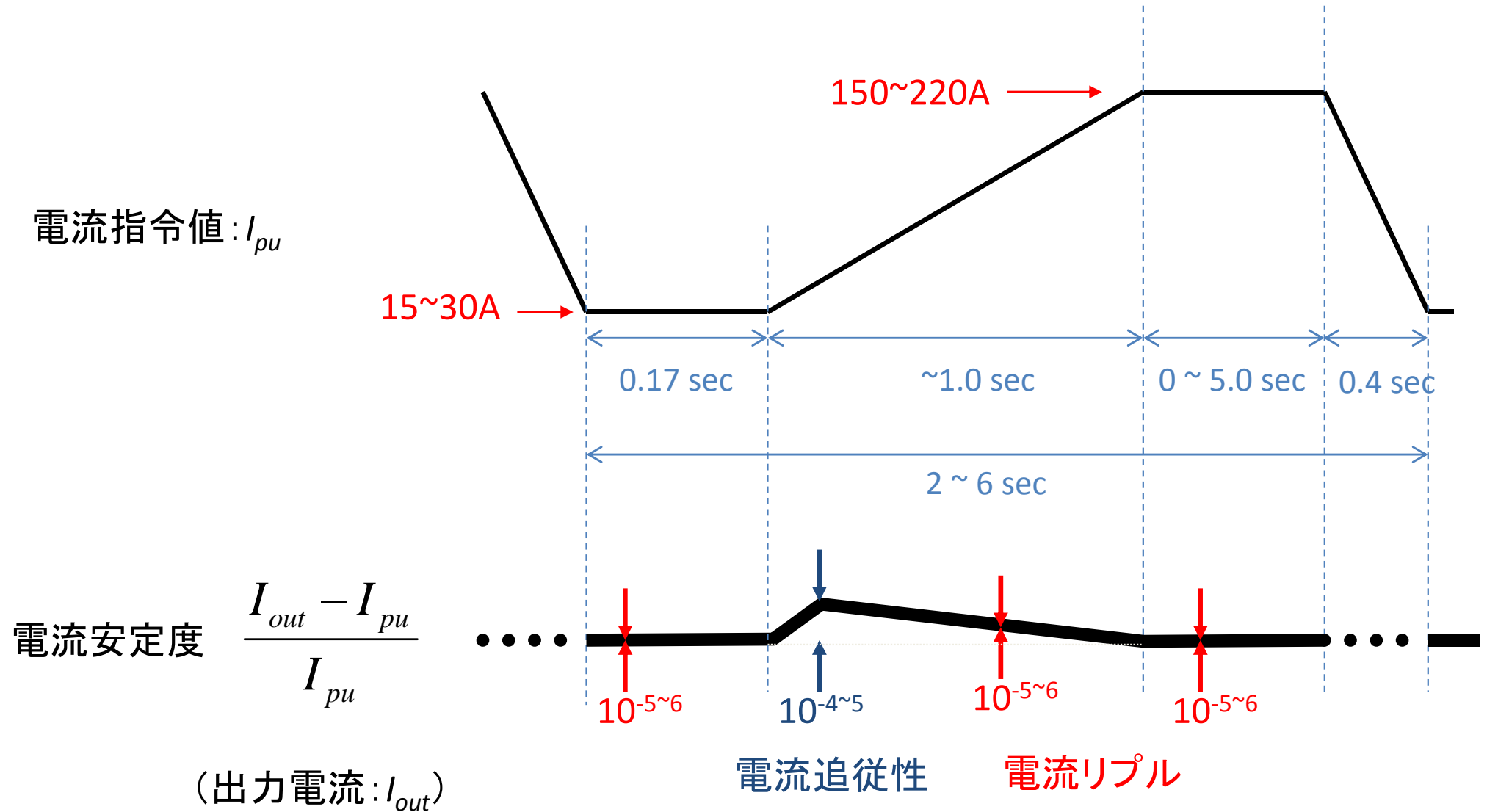
- スイッチングリップル

フィードバックループ周波数特性のカットオフ周波数より高くすることで、電磁石系のインダクタンスによってスイッチングリップルを低減する。

- 整流リップル

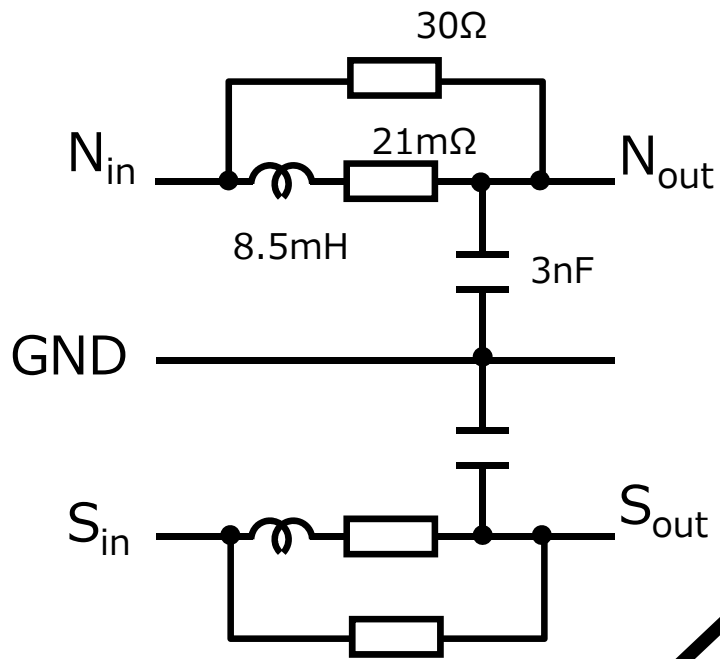
整流回路と変換器とを分ける(AC-DCコンバータ単独によるパターン電流出力ではない)。また整流回路のLとCを大きくすることでカットオフ周波数を低く抑え、**コンバータの入力部分で 10^{-4} 以下**のリップルとする。

試作機的目標性能

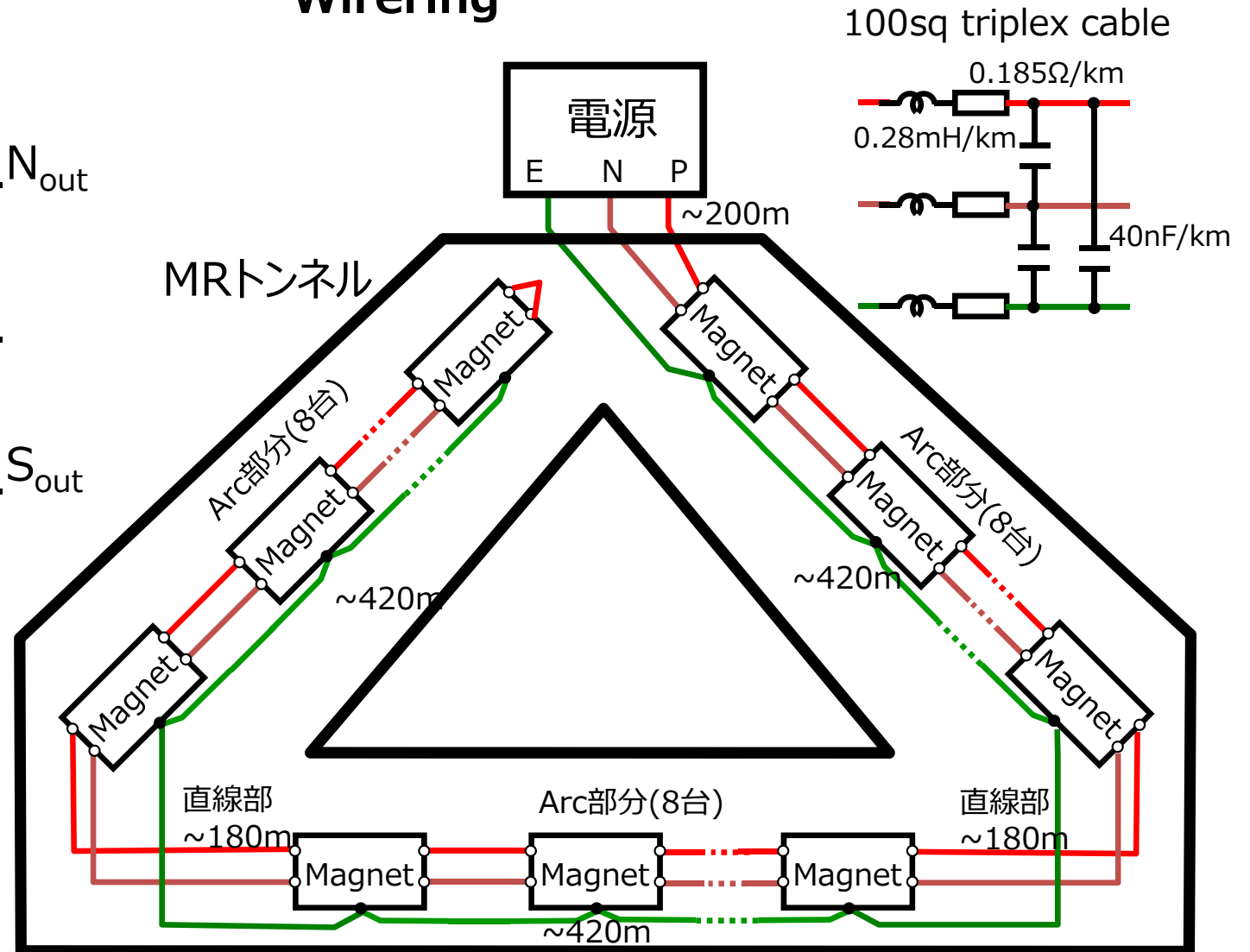


負荷インピーダンス

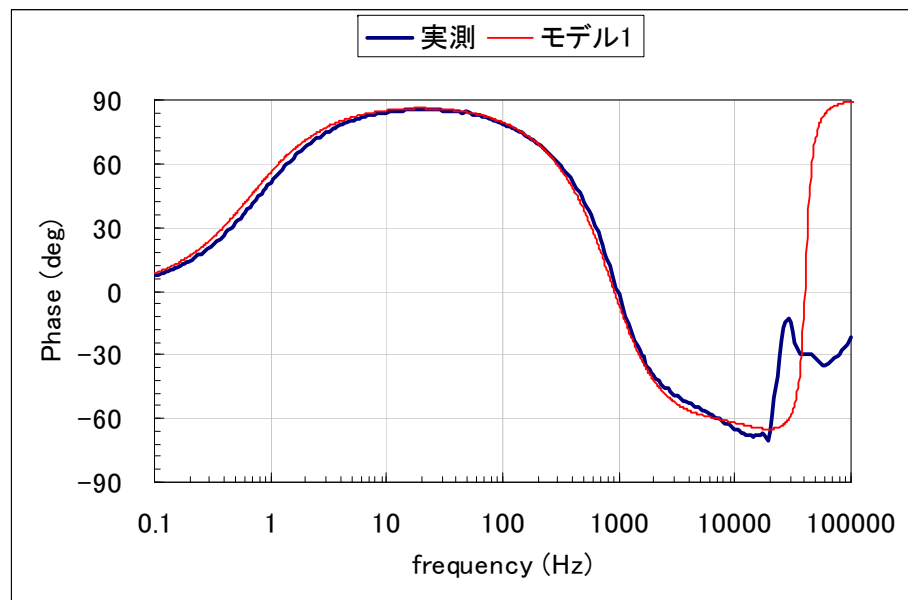
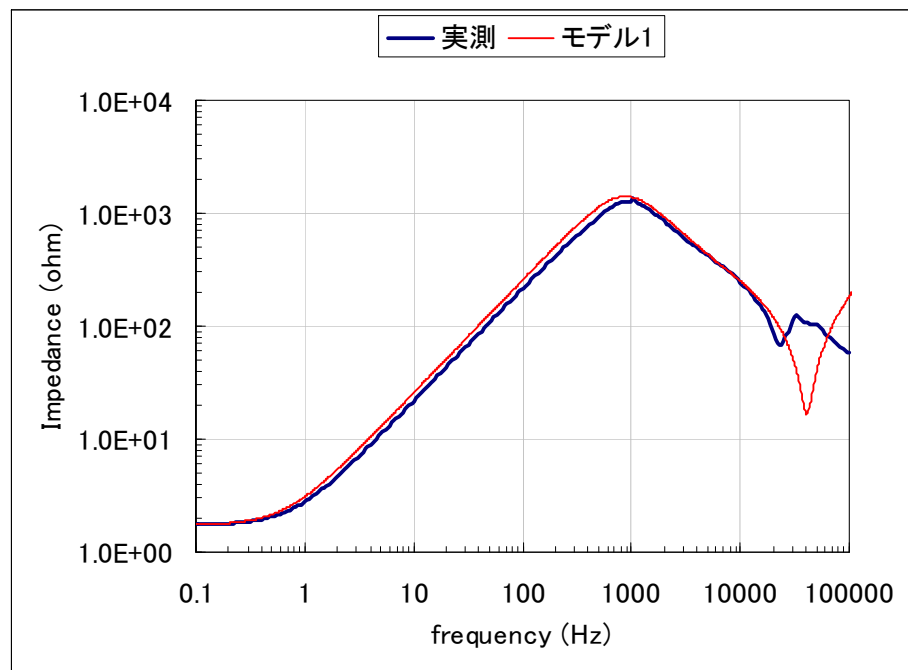
Sextapole Magnet



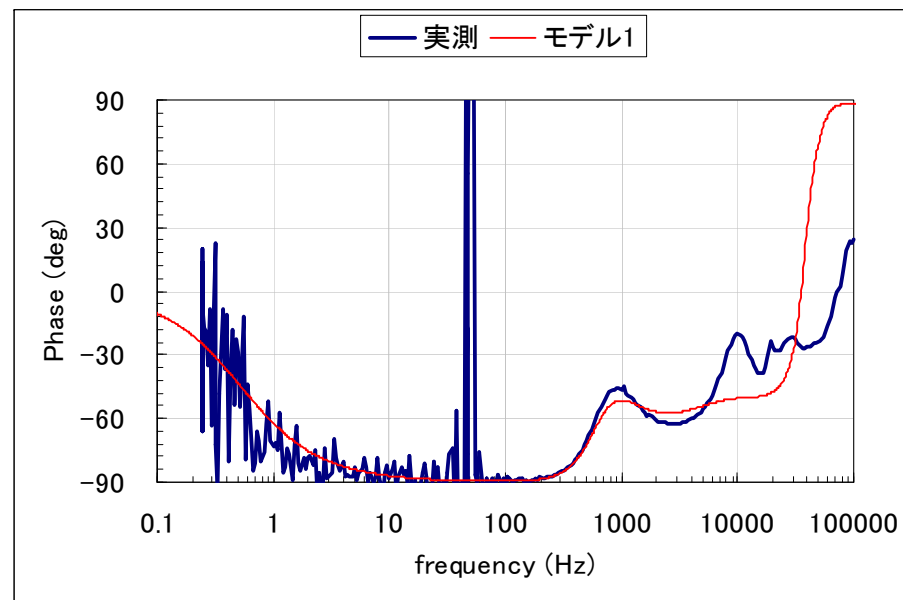
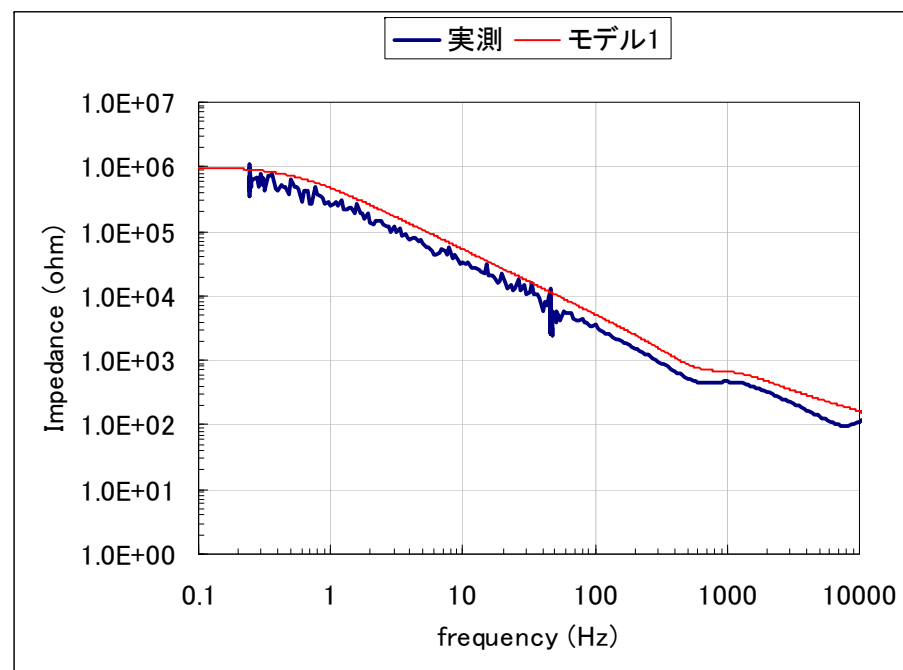
Wirerung



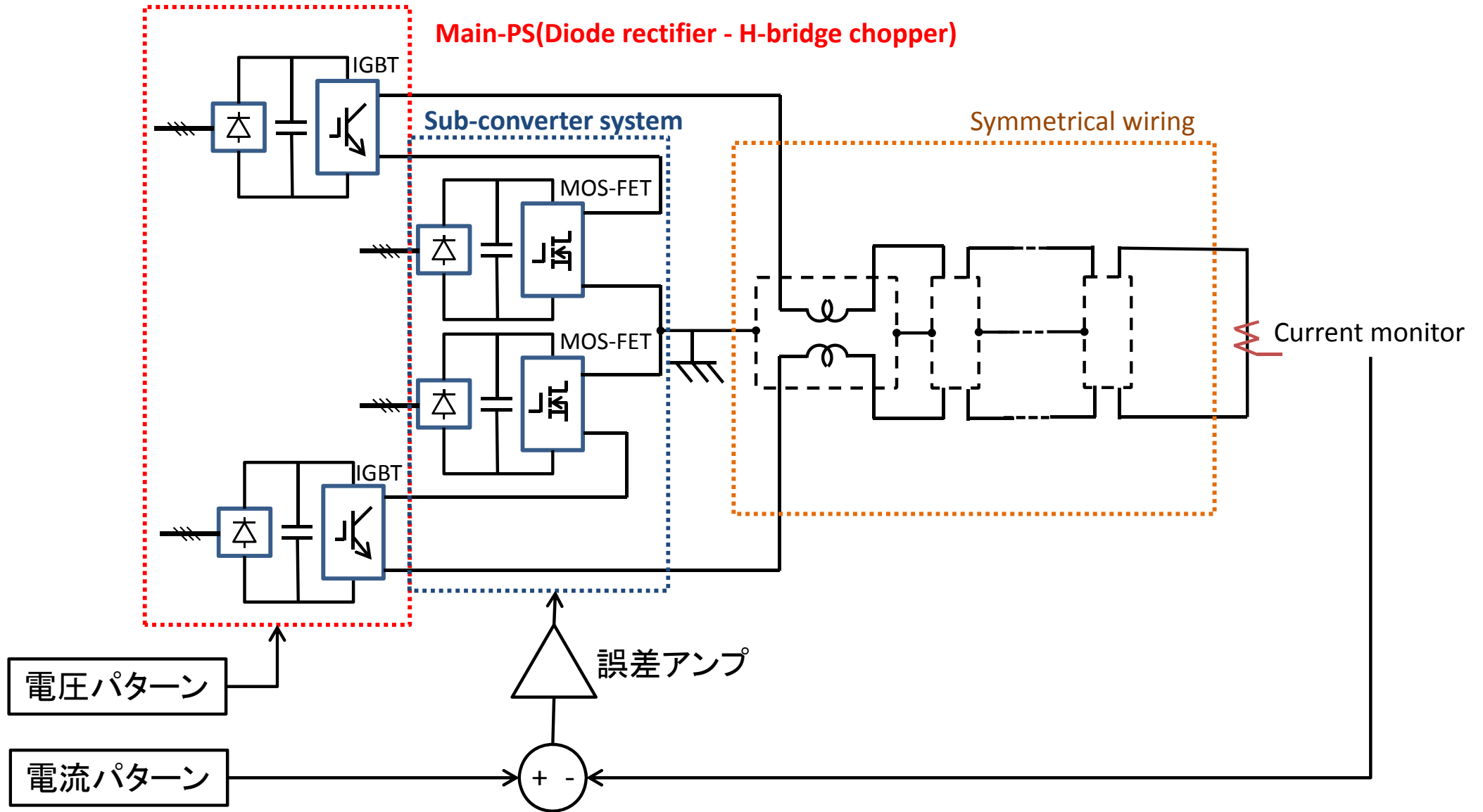
P-N間Impedance



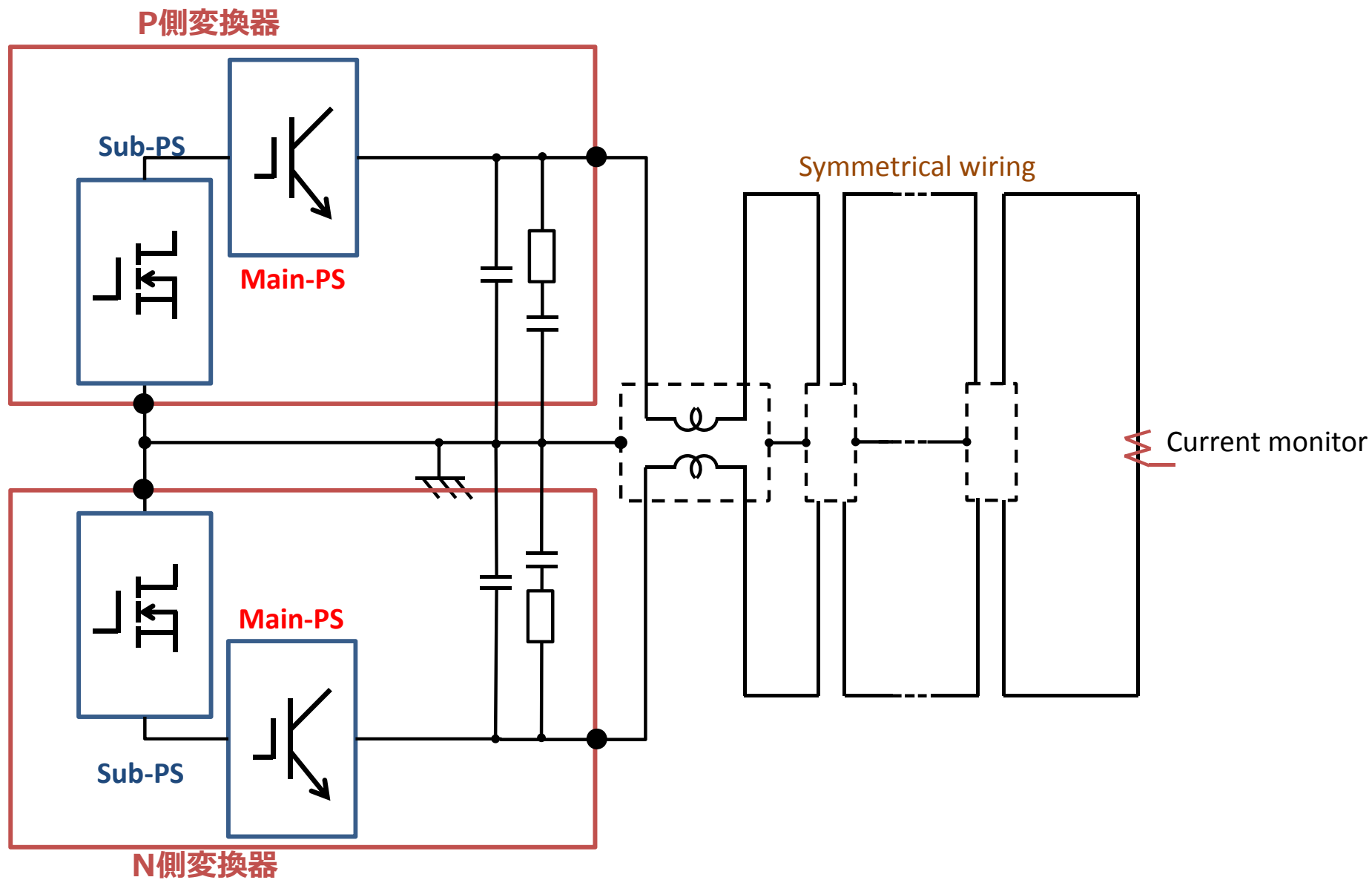
P-E間Impedance



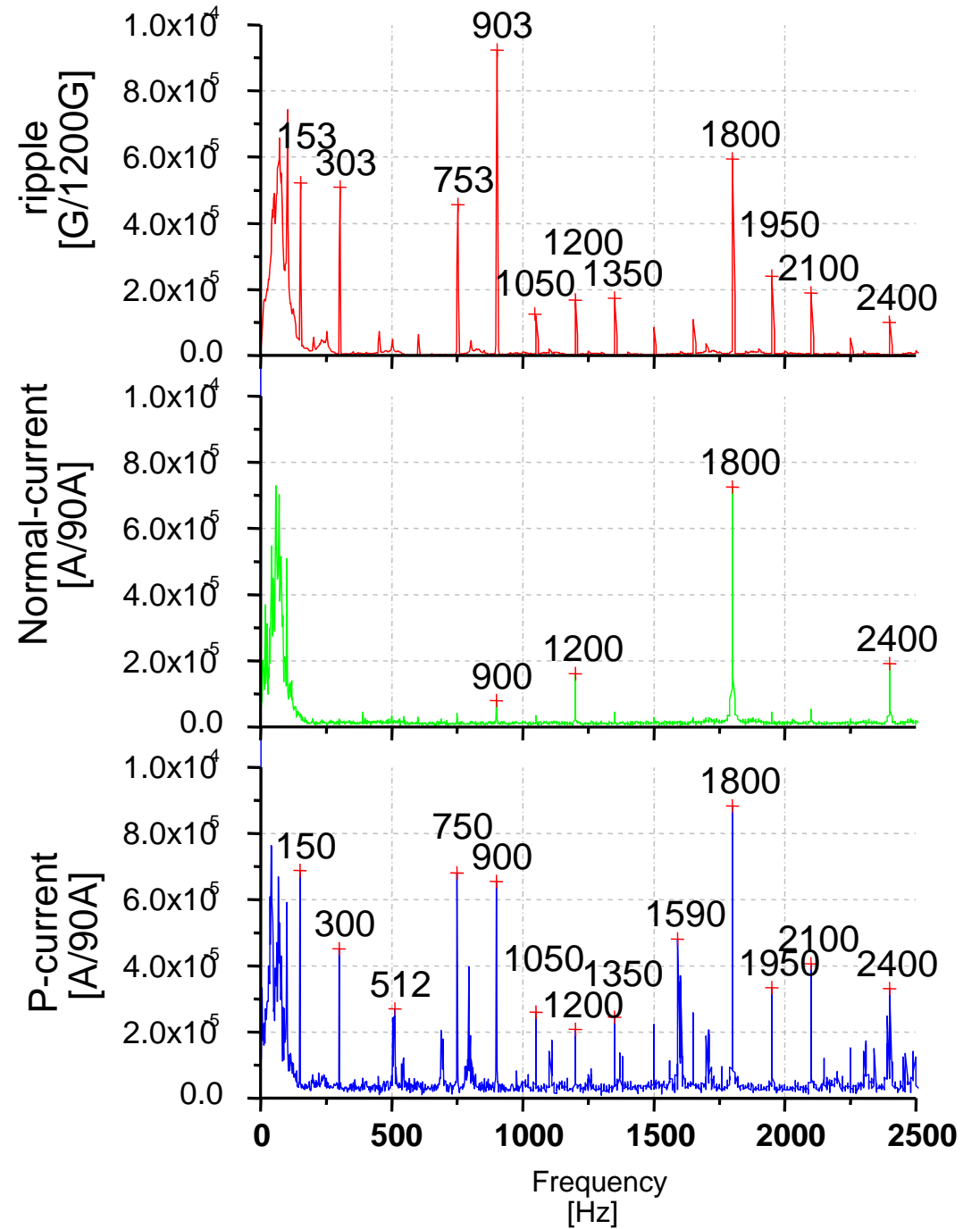
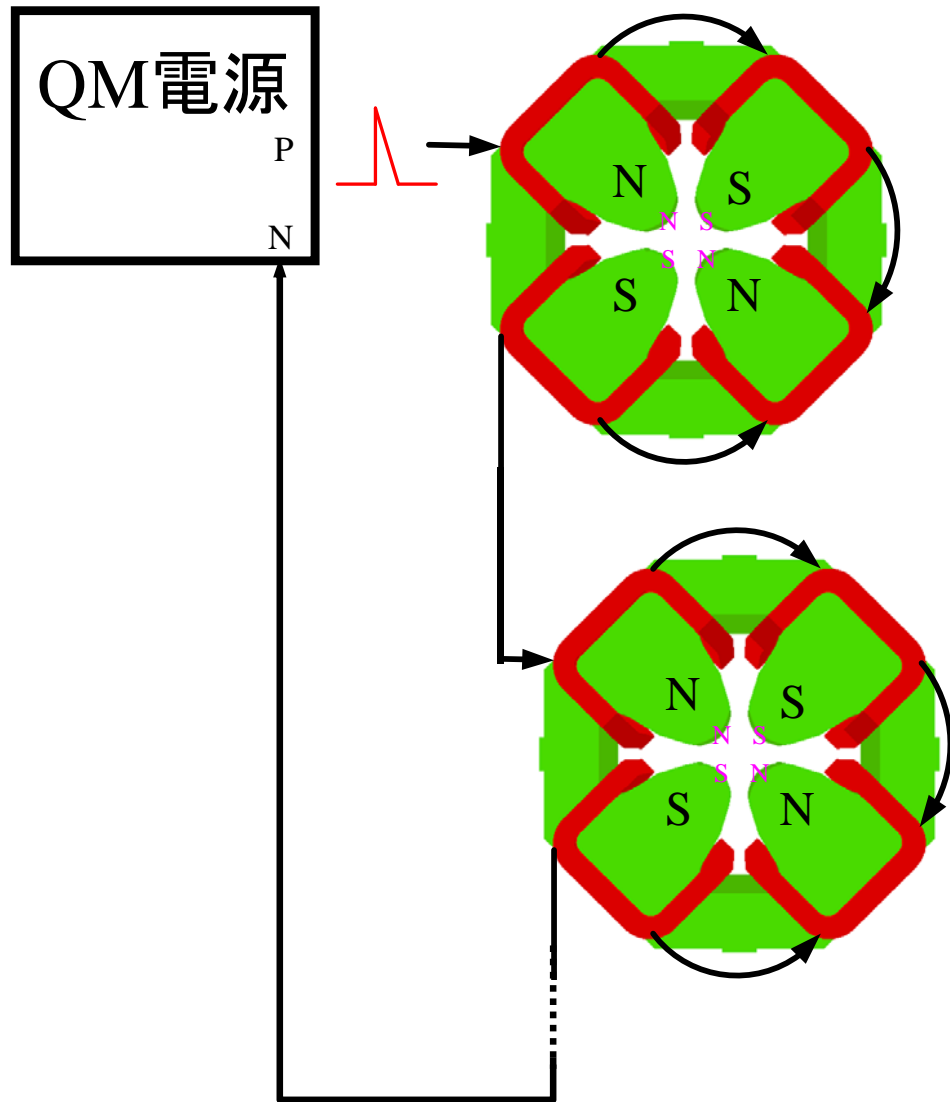
電源の基本構成

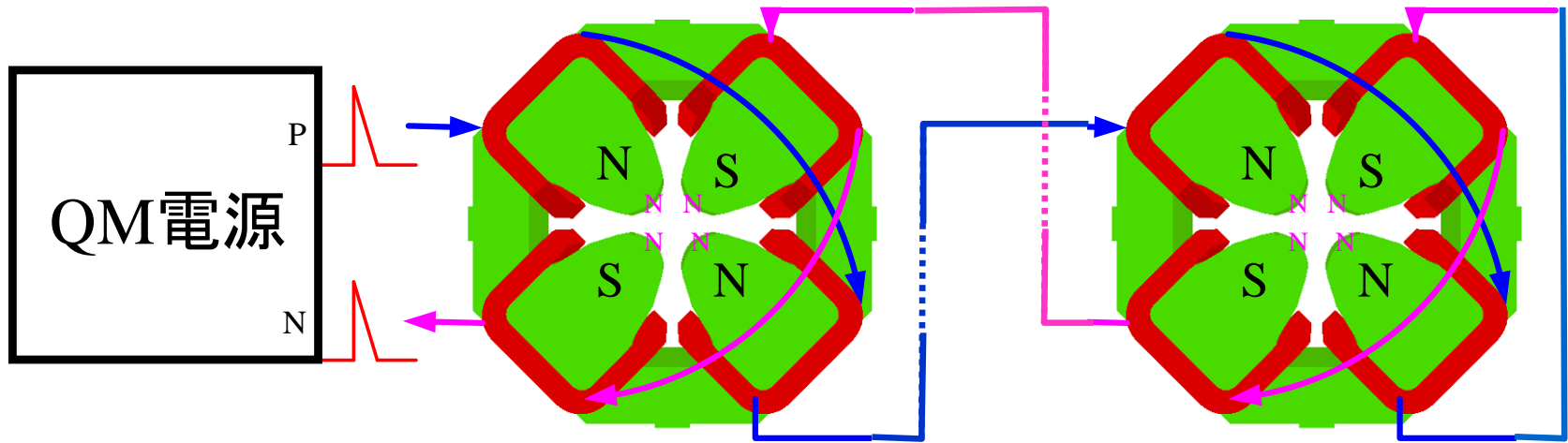


電源の対称化

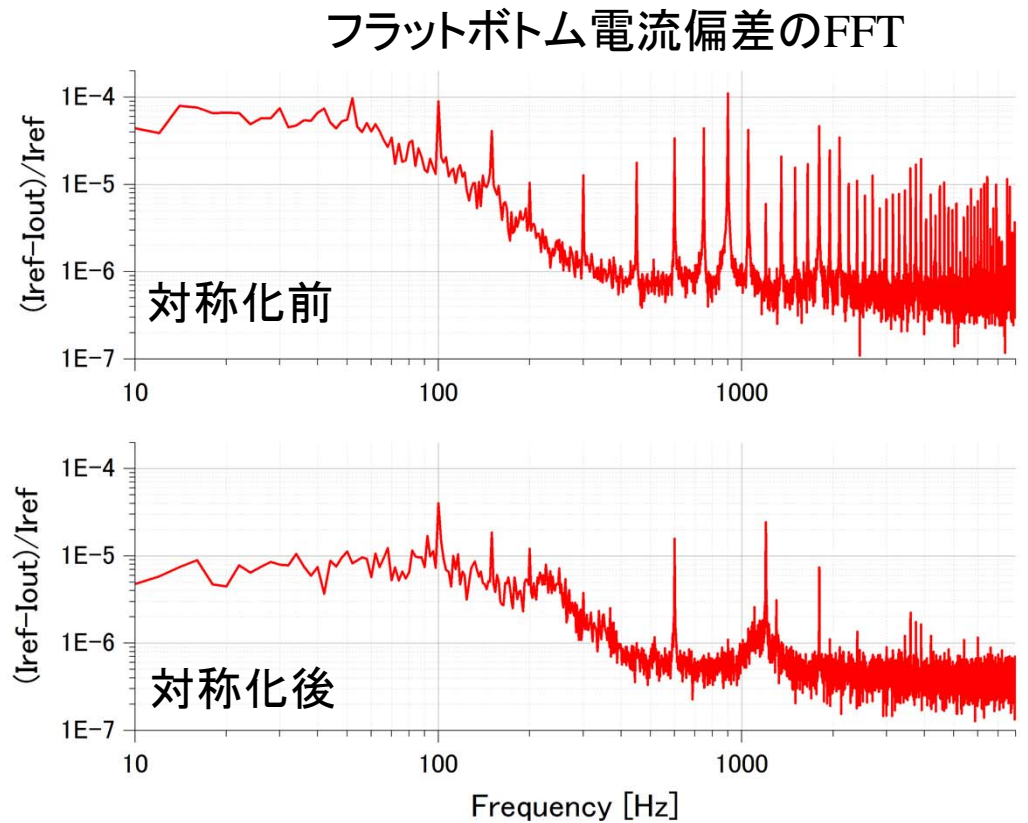
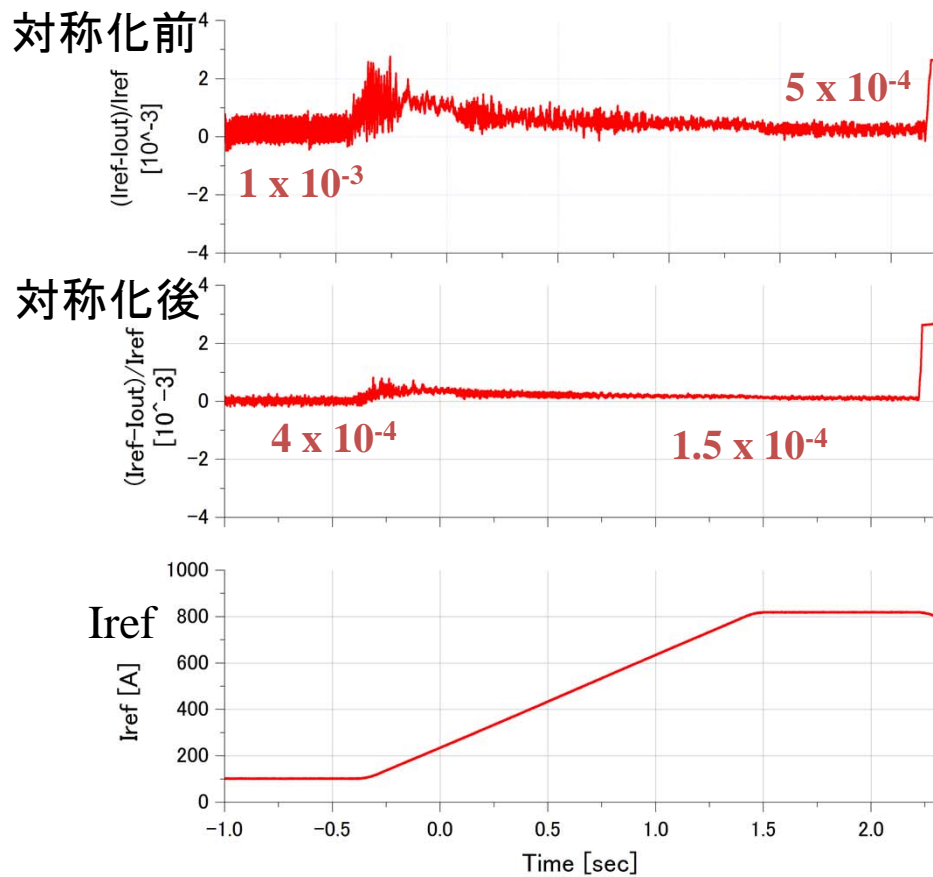


非対称な配線ではコモンモード電流が磁場に現れる。

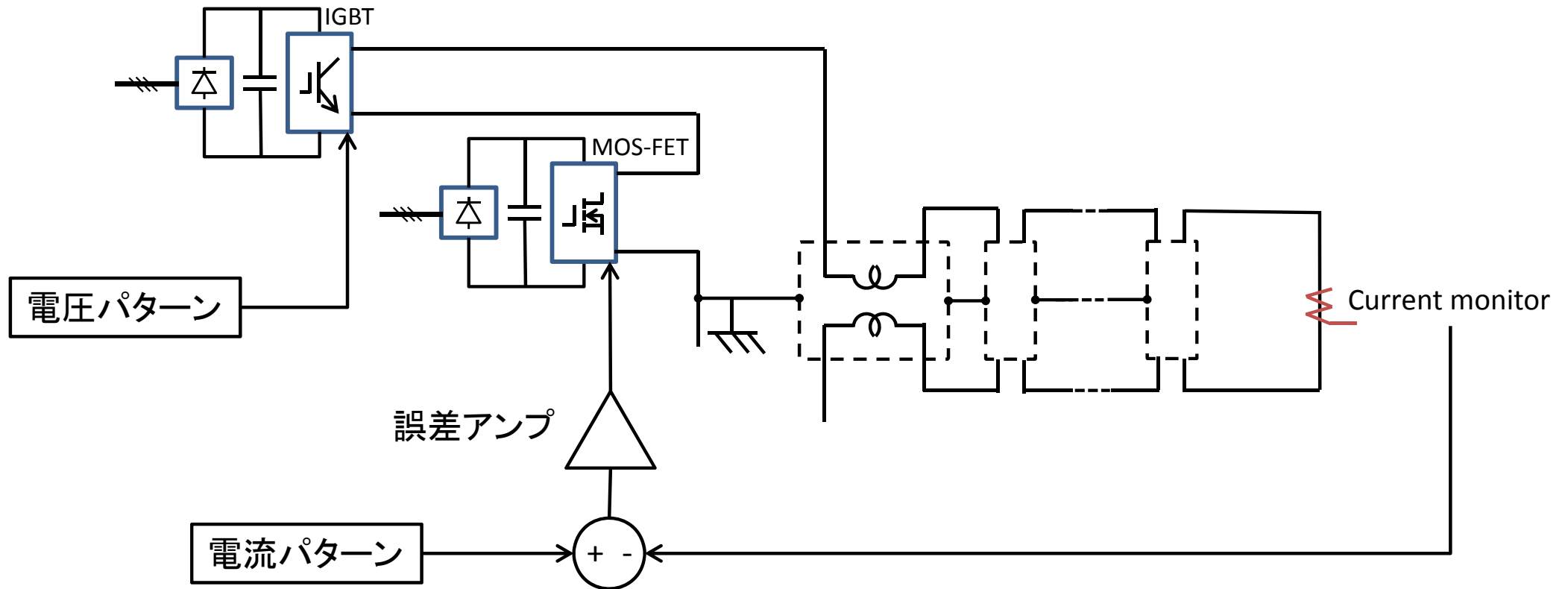




磁極を分割、N極を渡って、S極で電源に戻る

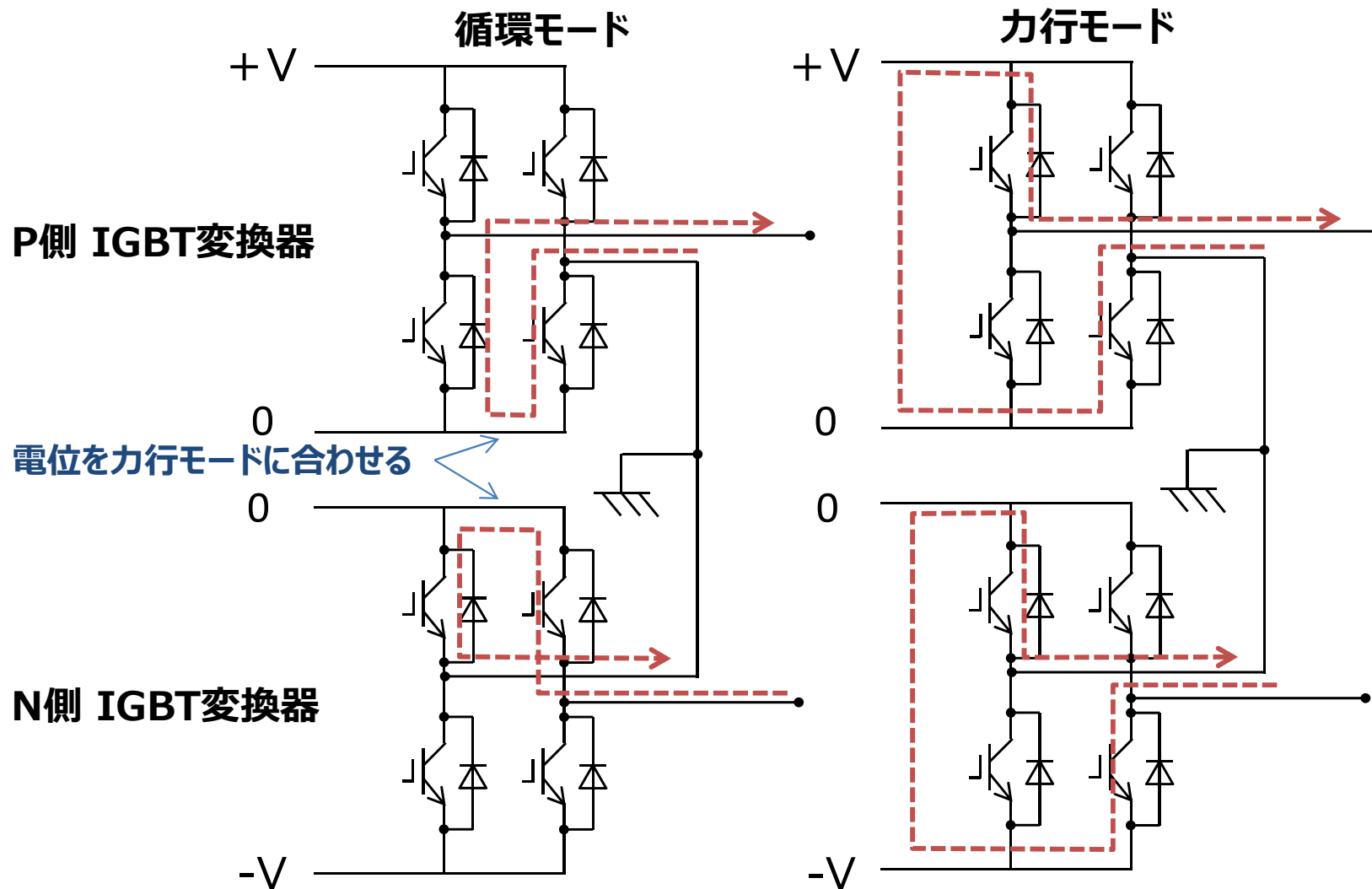


副変換器の導入



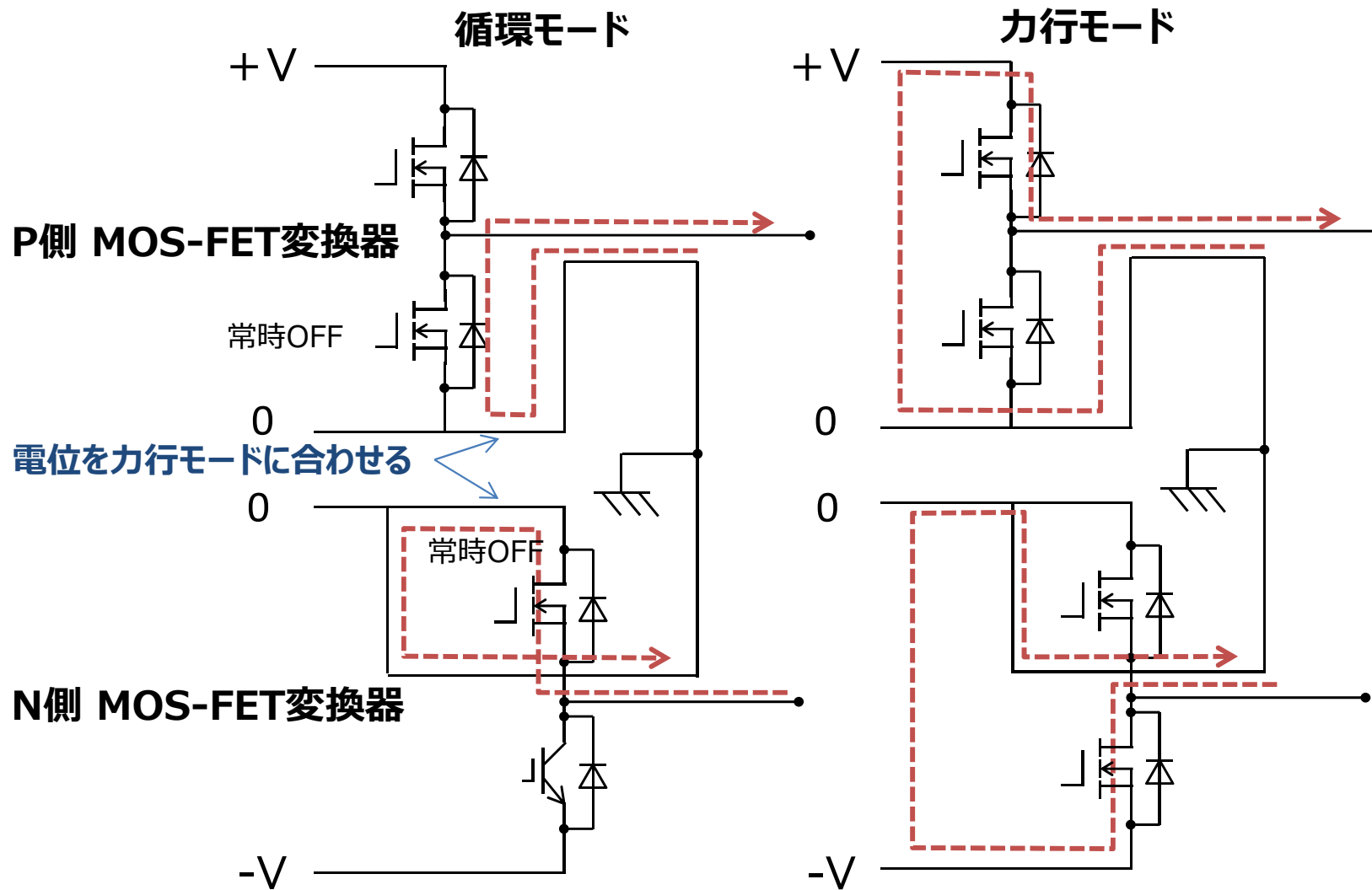
	SW (Carrier)	Control	Number of module	Output
Main converter	IGBT (~18kHz)	Voltage feed forward	2-p	Pattern current (90%)
Sub converter	MOS-FET (~80kHz)	Current feedback	10-p	Ripples (10%)

IGBT変換器の動作



ただし、回生モードでは中点電位は+Vと-Vに振られる。

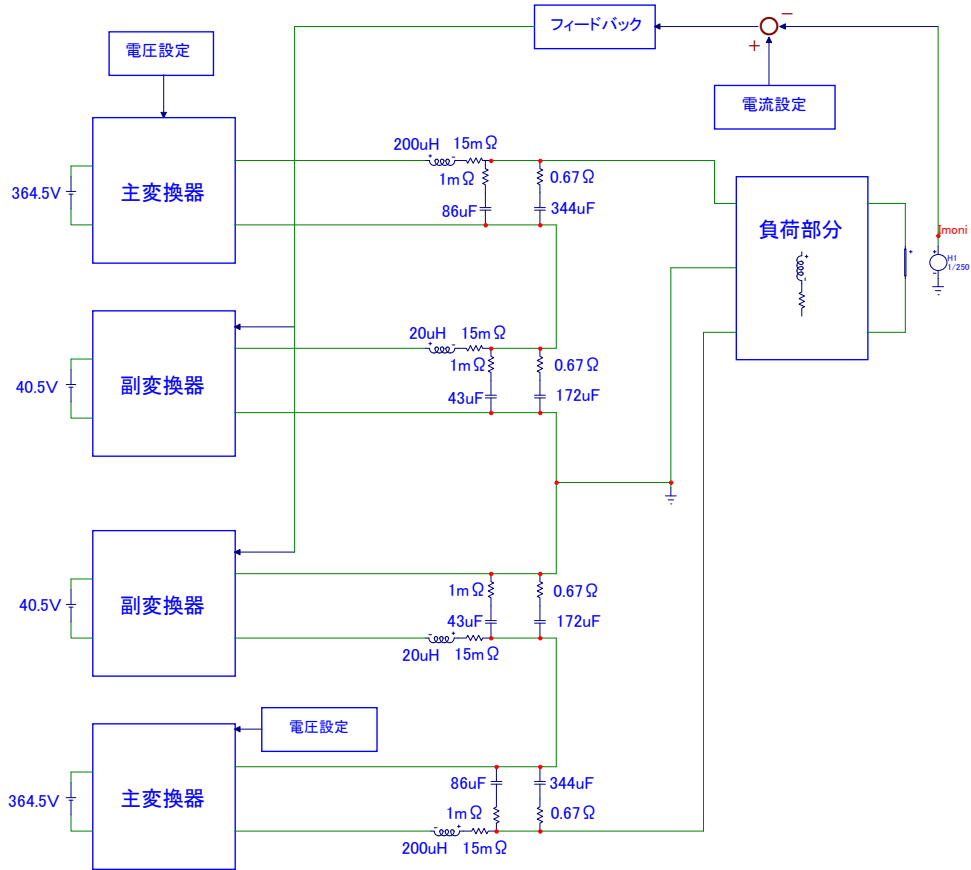
MOS-FET変換器の動作



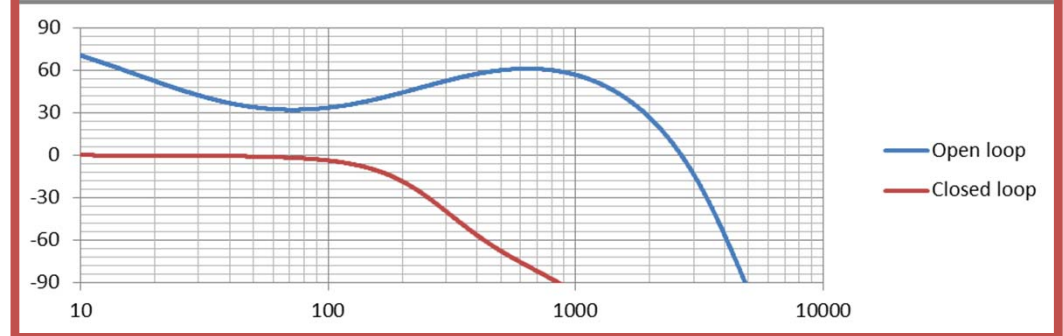
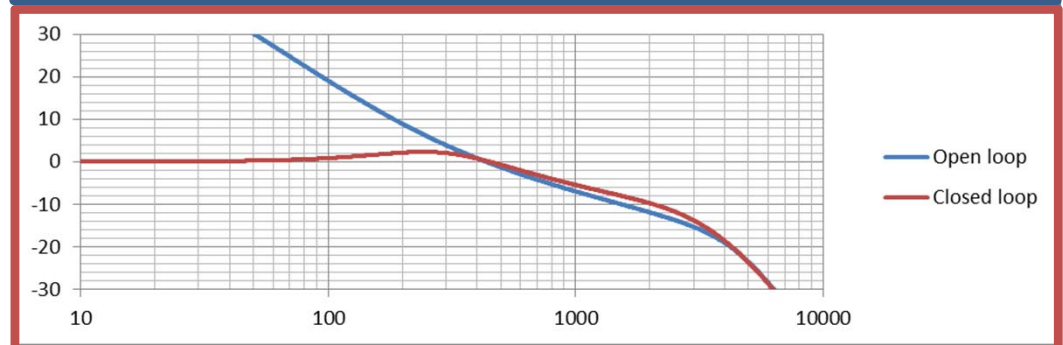
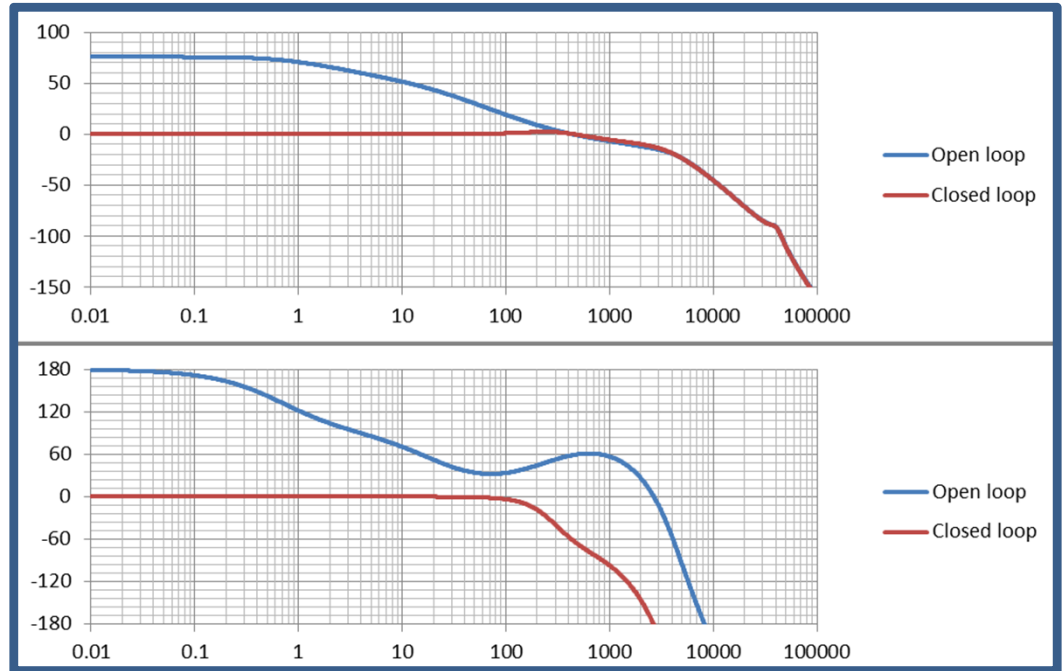
バンクコンデンサへの過充電を防ぐため。降圧チョッパ型とした。
常に0V以上の電圧を出力するので、電流指令値より大きい電流は補正できない。

周波数応答特性

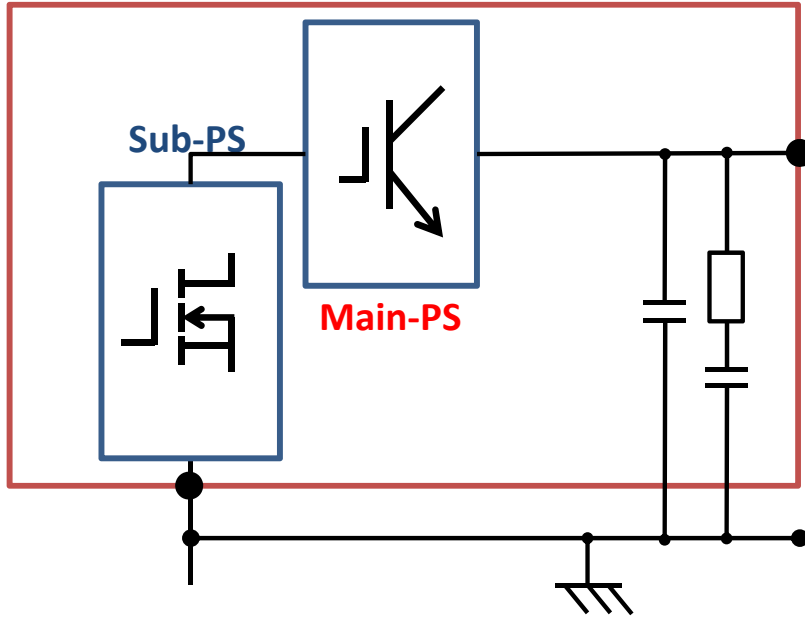
解析モデル



多段誤差アンプによる
電流フィードバック制御



変換器のモジュール化



Main-PS
IGBTモジュール



Sub-PS
FETモジュール

もっとも壊れやすい変換器をモジュール化することで、故障時の交換作業を簡素化する。



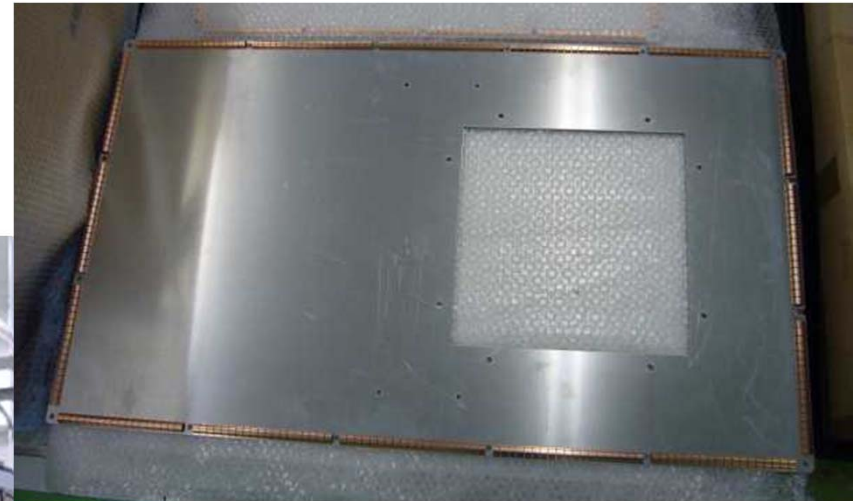
電源故障によるビーム停止時間の短縮


変換器からのノイズ対策

制御線は種類別に上部の専用ダクトを通す。



電源フレームと側板はコンタクトフィンガーによって確実に接触させる。

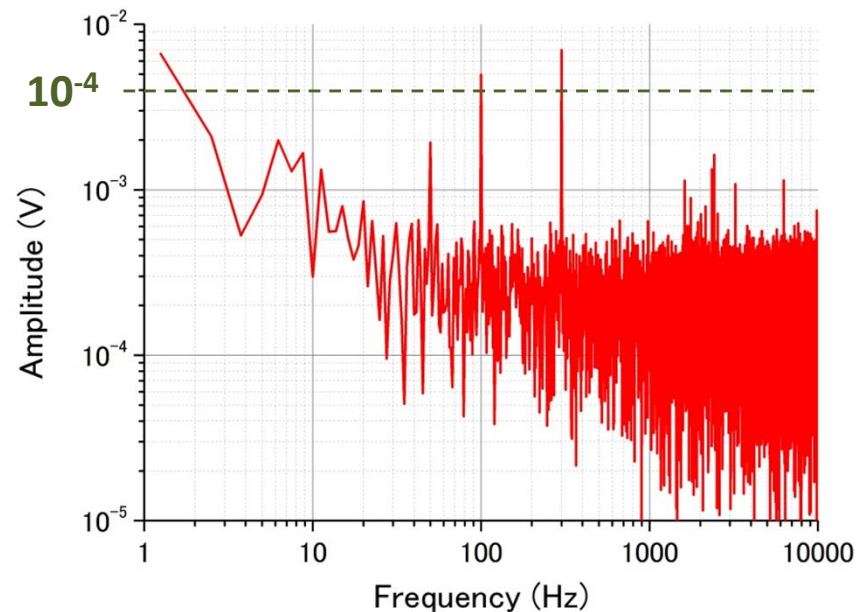
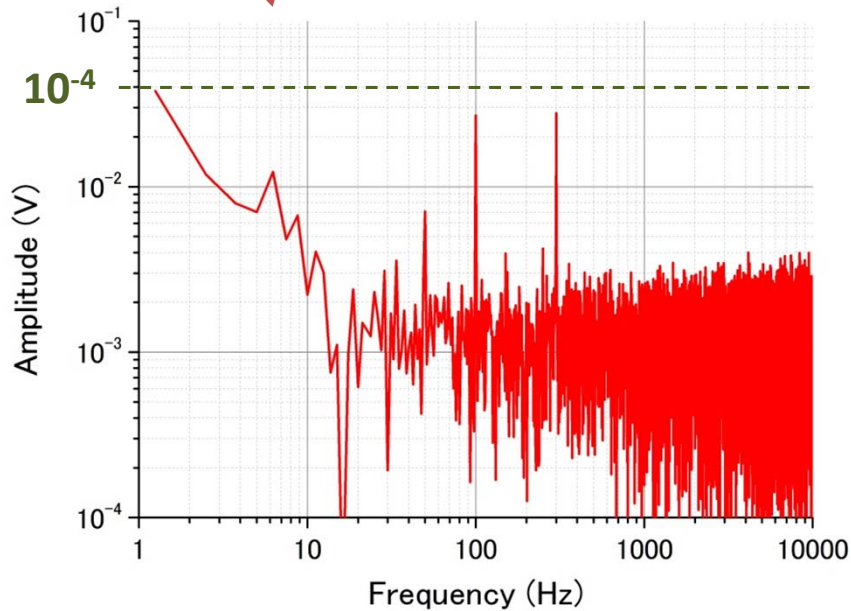
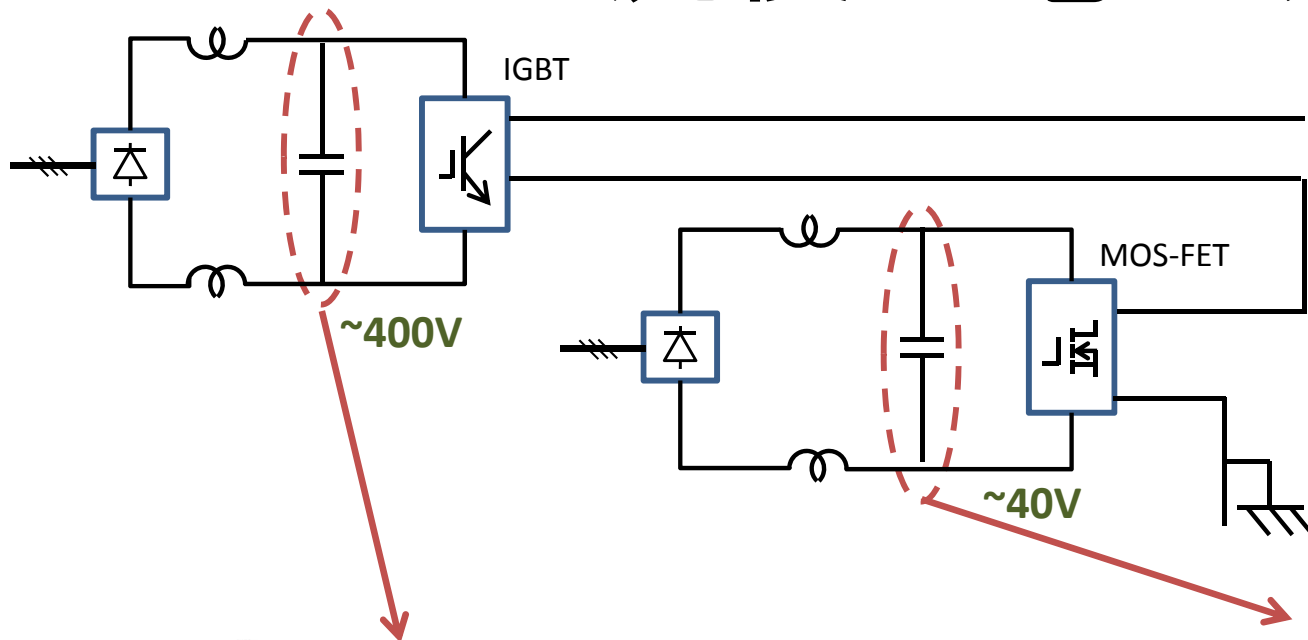




2.3m

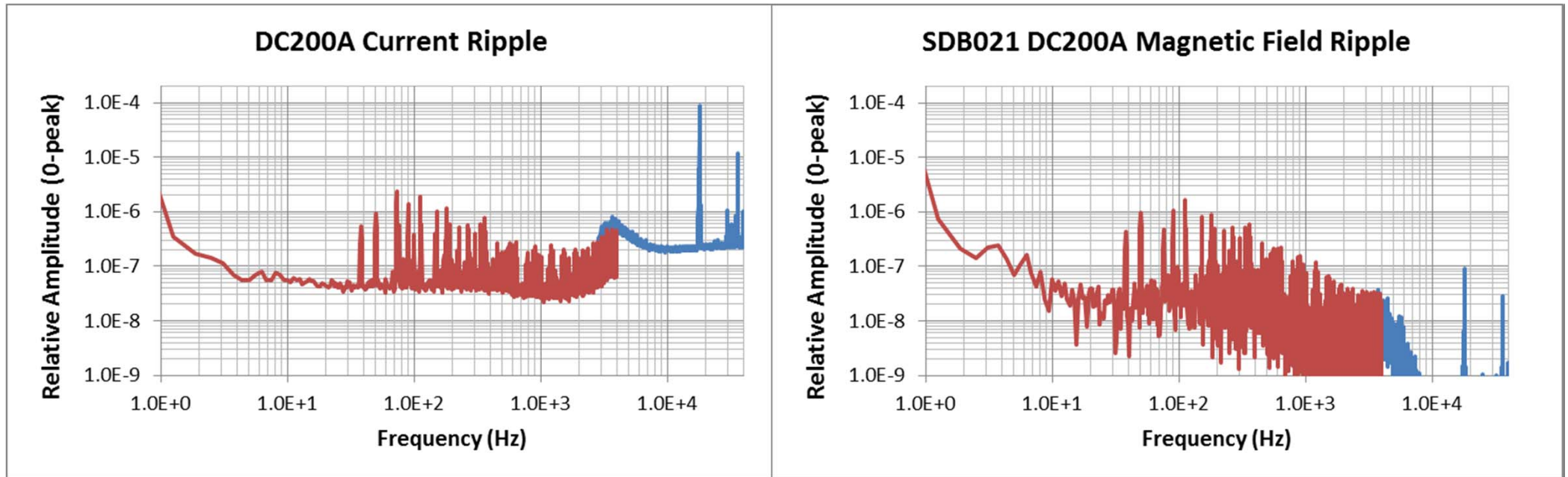
5.7m

整流後の電圧リップル



実負荷通電時のリップル性能

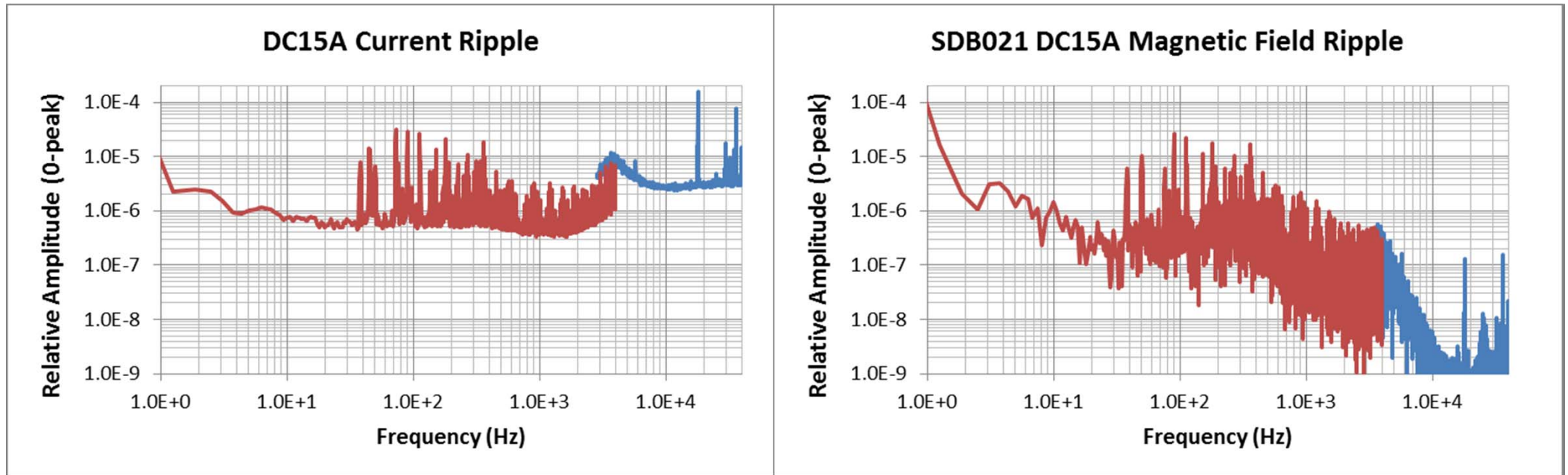
200A DC通電時のリップル(0-40kHz)



- Current Rippleは300A/10VのDCCTを電源出力に設置して測定
- Mag Field RippleはサーチコイルをMinimum gapに挿入して測定

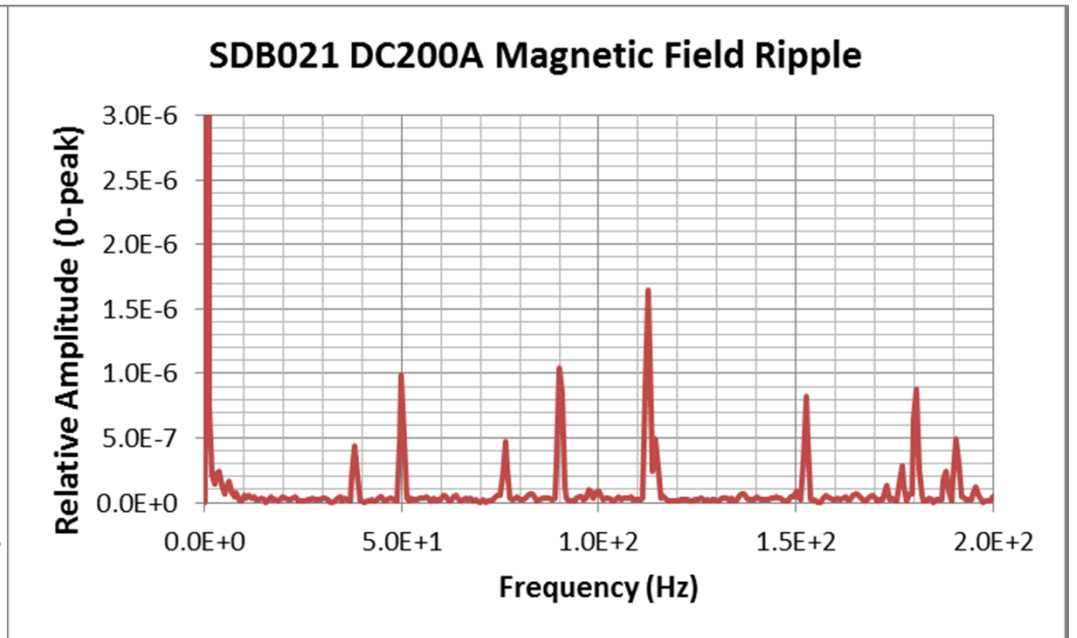
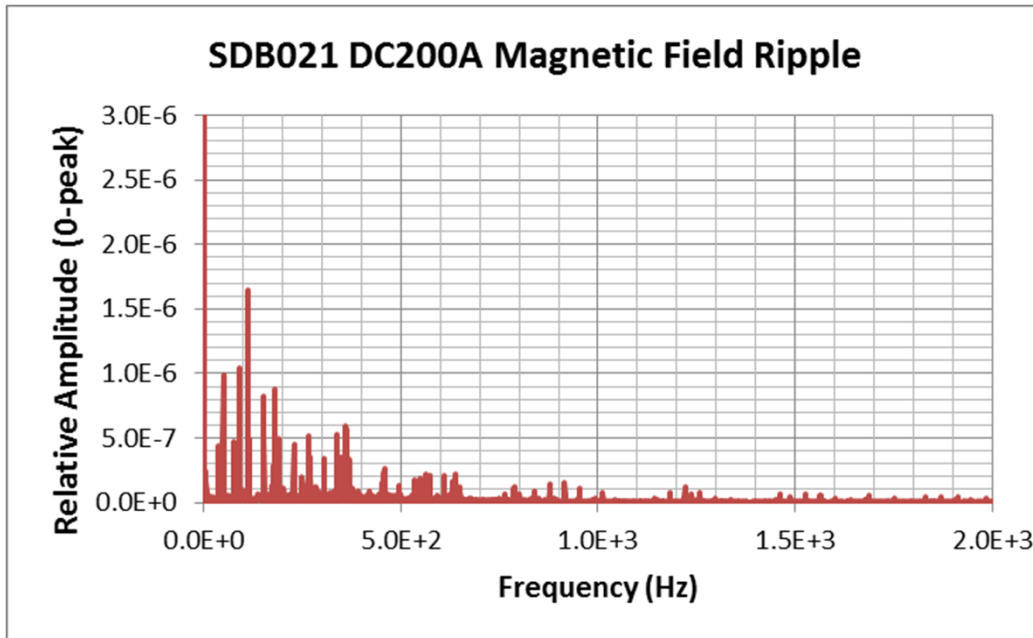
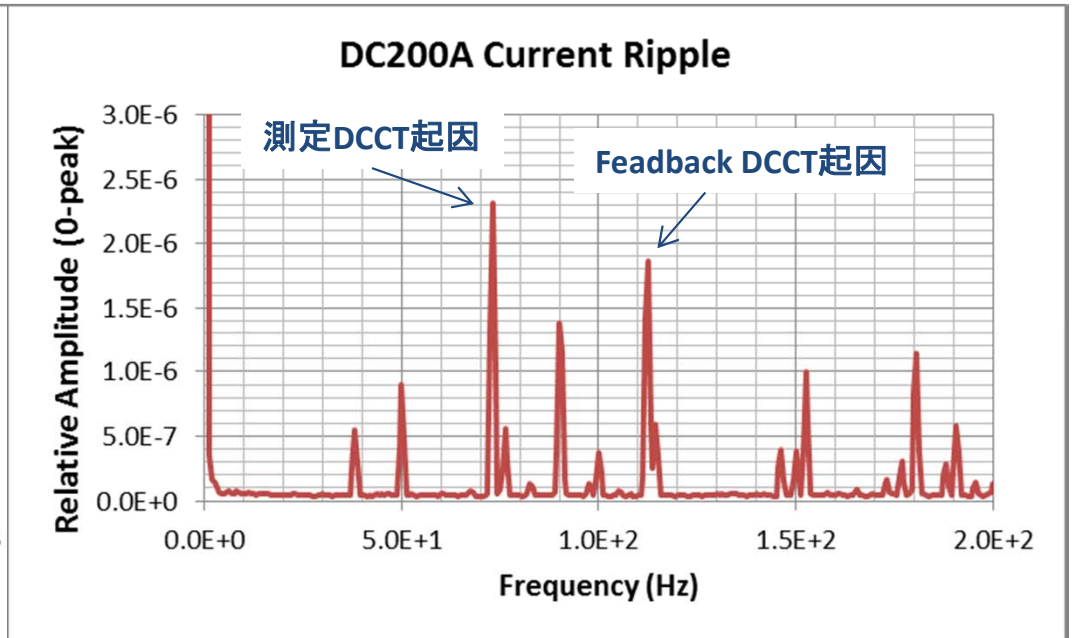
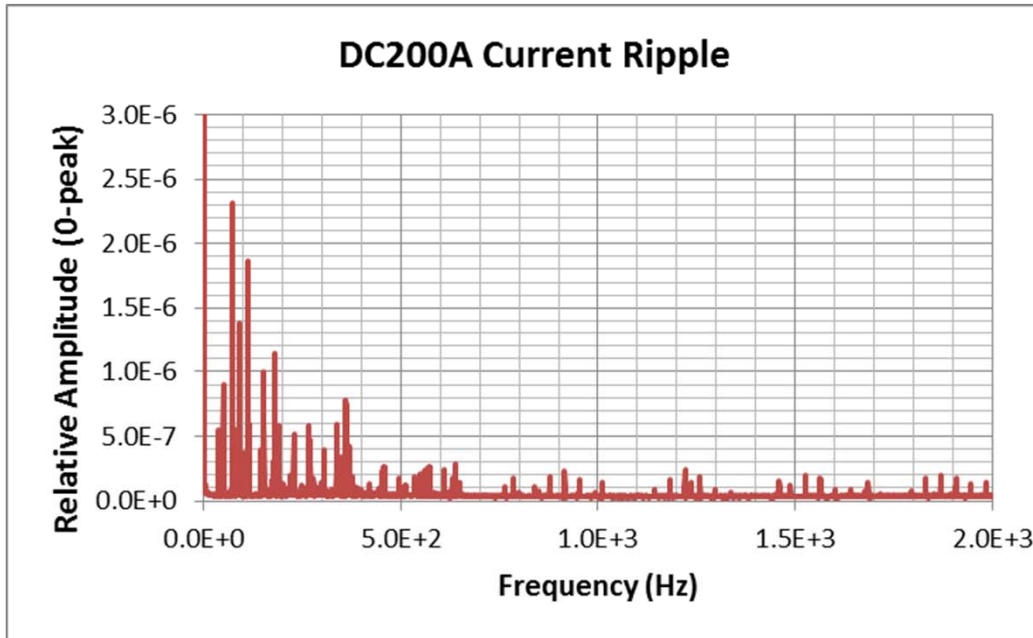
実負荷通電時のリップル性能

15A DC通電時のリップル(0-40kHz)



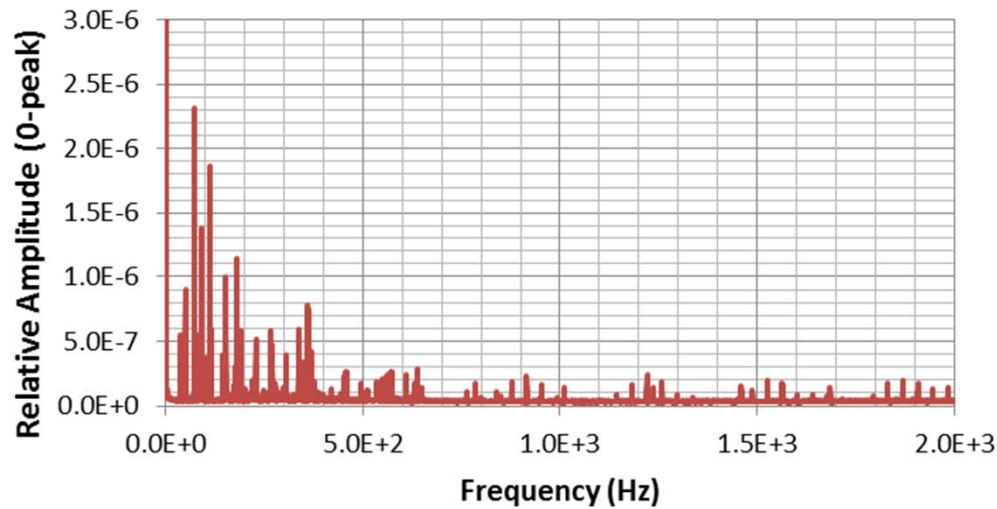
- 出力電流が約1/10となると、相対的にリップルは約10倍となる。

200A DC通電時のリップル(0-2kHz)

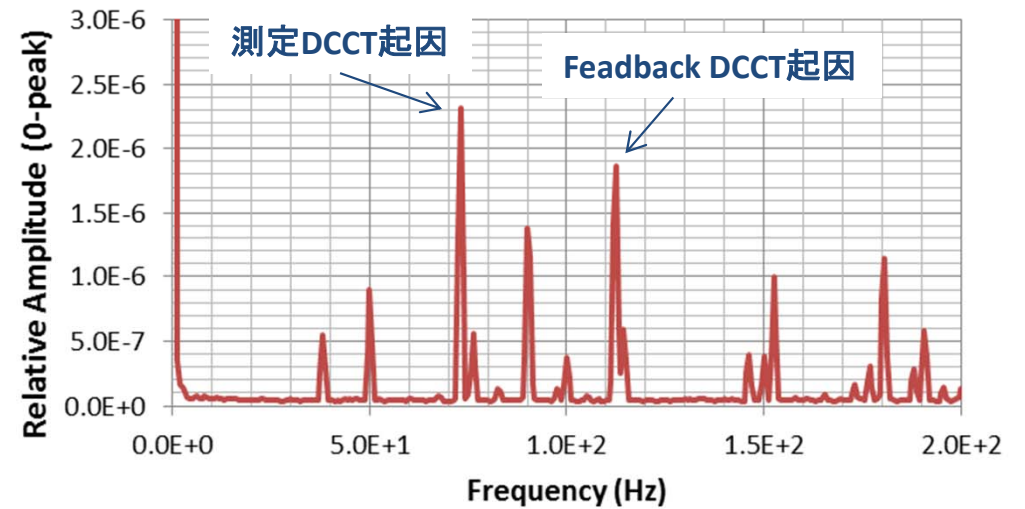


制御系のノイズ対策前後

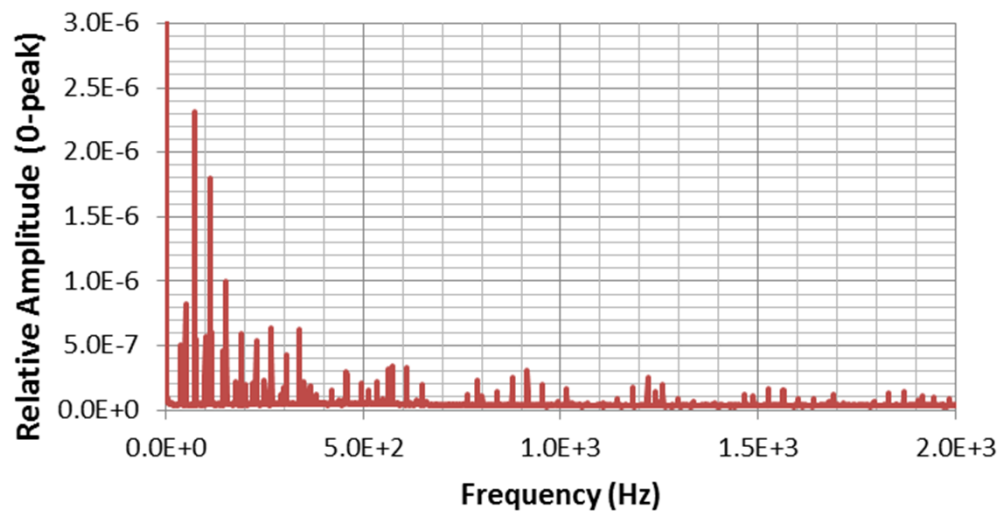
ノイズ対策前 DC200A Current Ripple



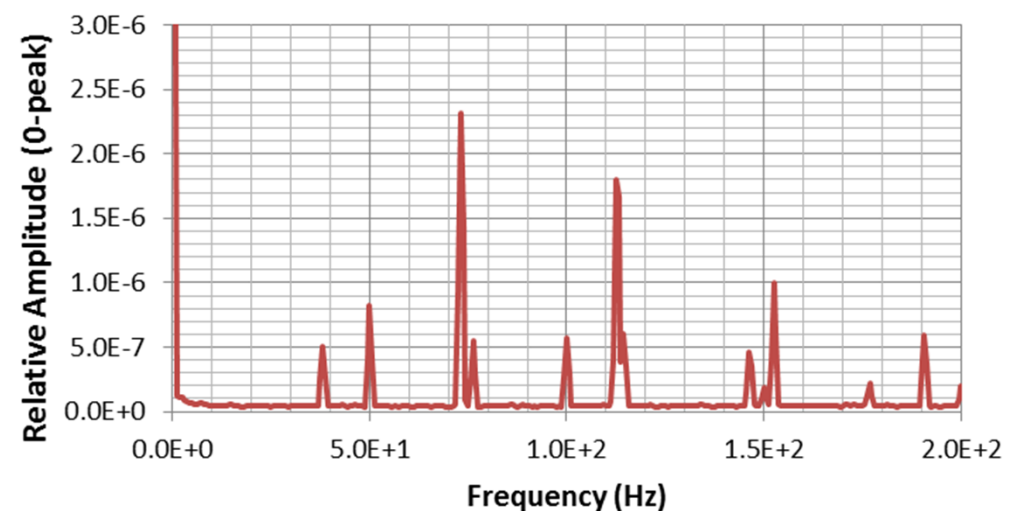
DC200A Current Ripple



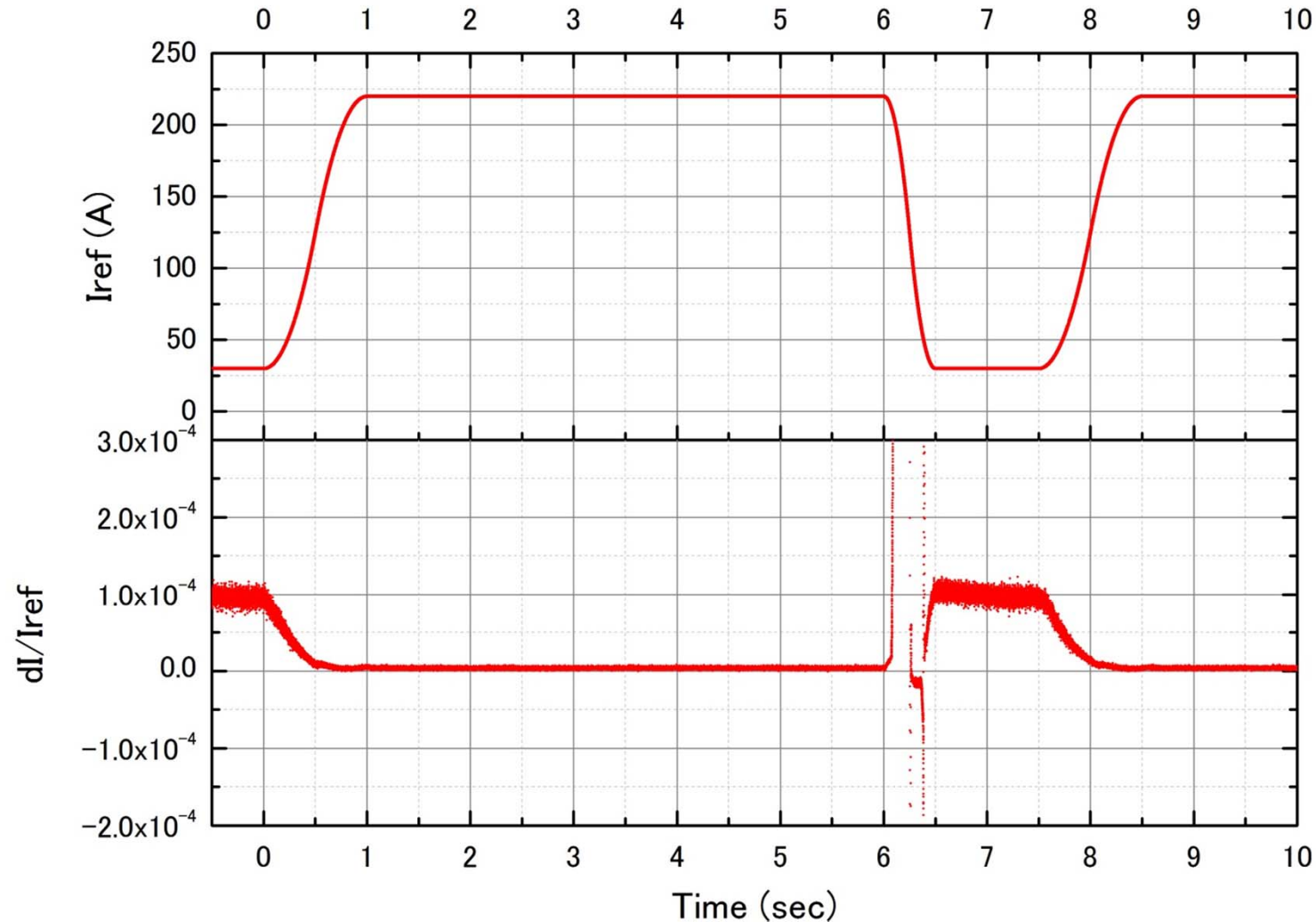
ノイズ対策後 DC160A Current Ripple



DC160A Current Ripple



定格パターン出力

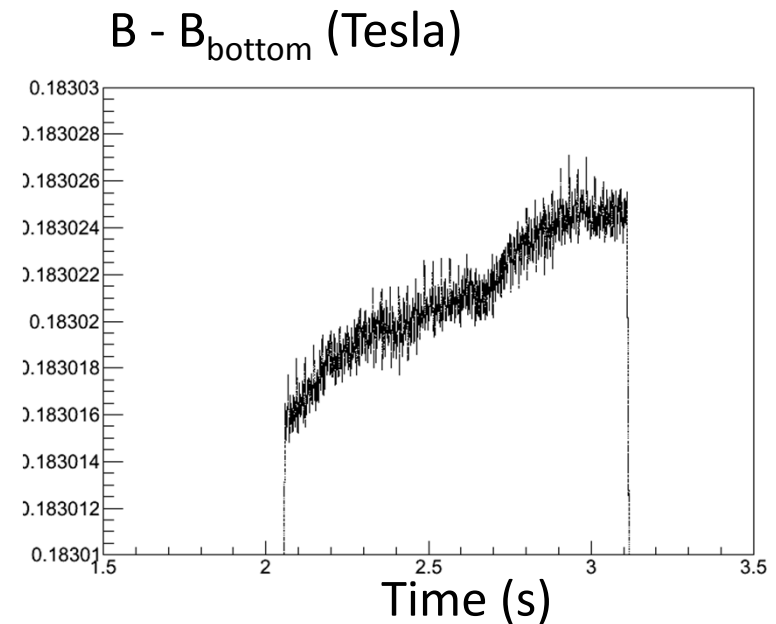
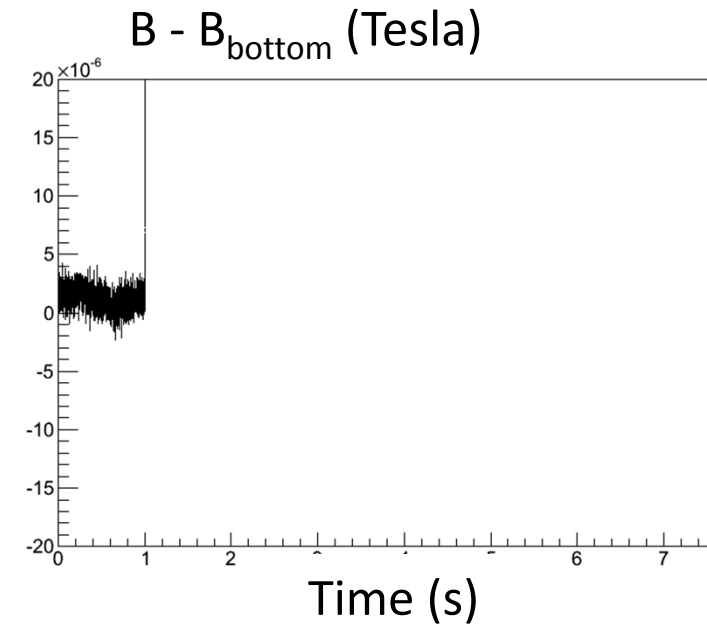
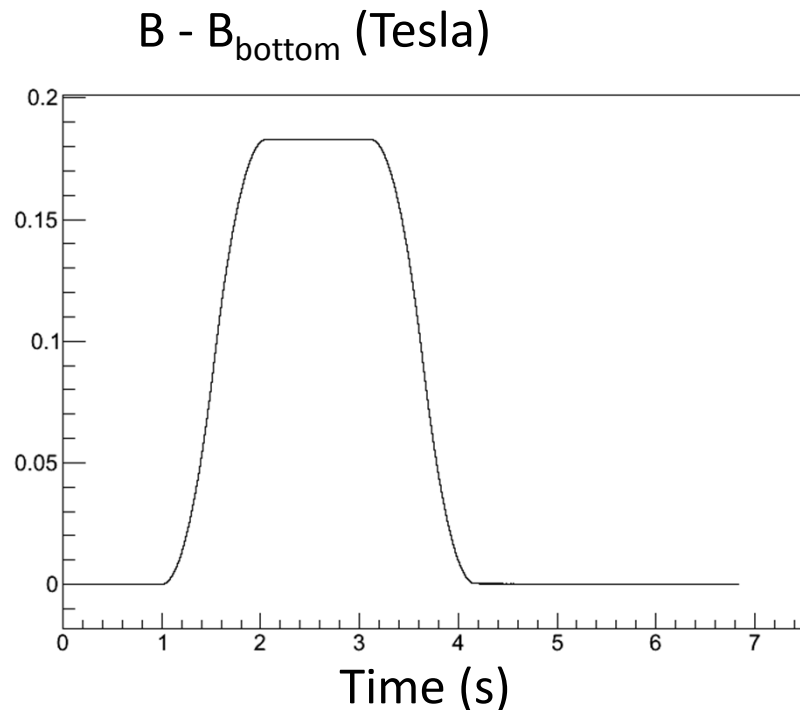


- フラットボトムで 10^{-4} のオフセットが残っているが、加速からフラットトップにかけて顕著な振動は見られない。

パターン通電時のSDB021の磁場

by 五十嵐、染谷

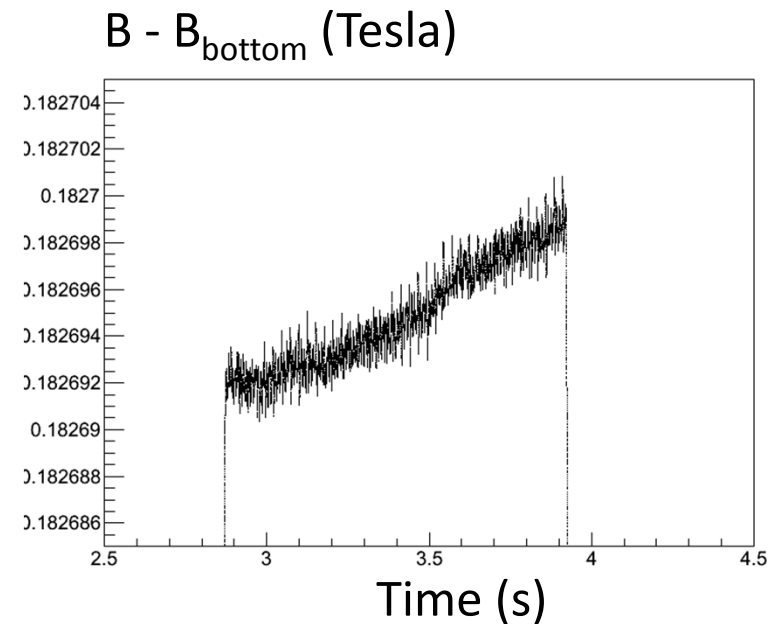
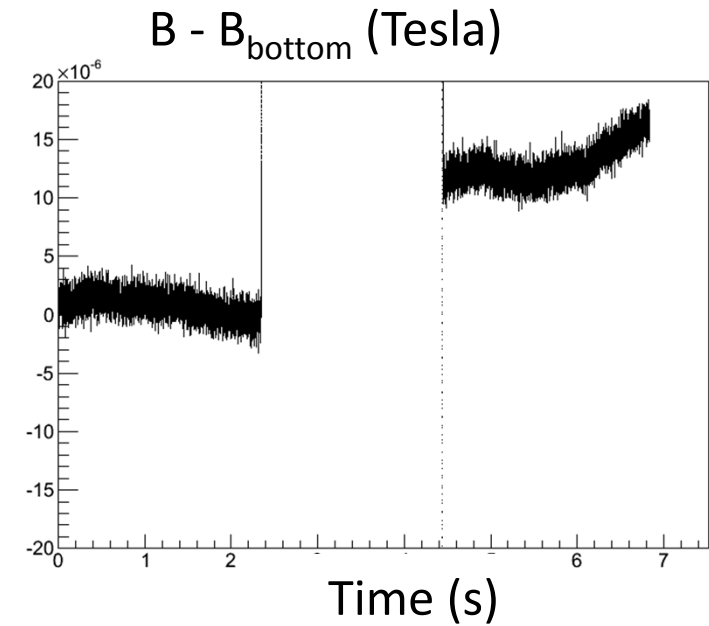
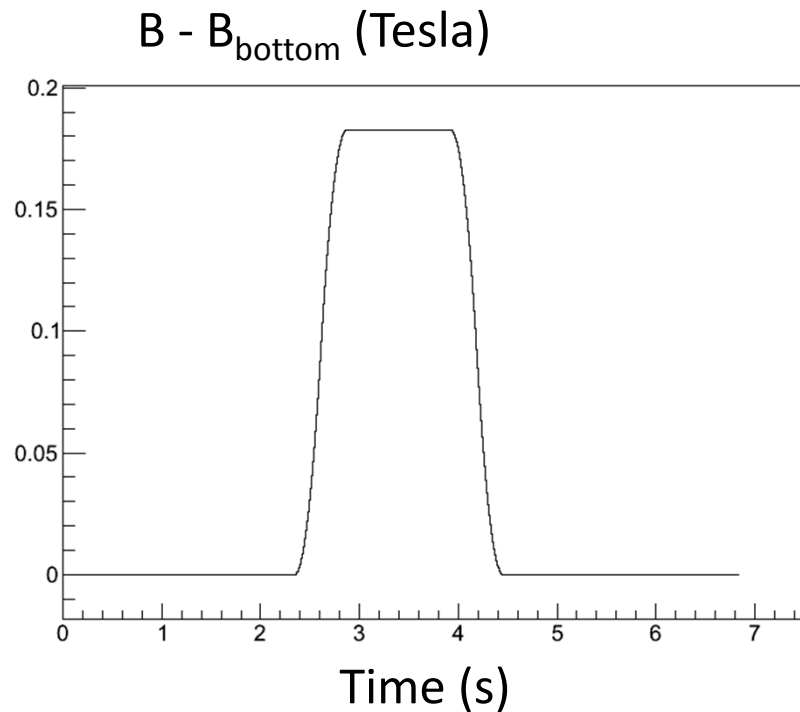
- 20 A ~ 150 A
- 0.225 T(?) – 0.028 T = 0.197 Tesla
- 加速時間 1 s
- Flat bottom ripple ~ 1E-4 (p-p)
- Flat top ripple ~ 1E-5 (p-p)



パターン通電時のSDB021の磁場

by 五十嵐、染谷

- 20 A ~ 150 A
- 0.225 T(?) – 0.028 T = 0.197 Tesla
- 加速時間 0.5 s
- Flat bottom ripple $\sim 1\text{E-}4$ (p-p)
- Flat top ripple $\sim 1\text{E-}5$ (p-p)



今後の課題

- リプルの周波数成分と時間波形
 - 周波数成分で最大のものは 1.5×10^{-6} であるが、時間波形ではpeak to peakで 1×10^{-5} と一桁近く大きい。
 - 原因は 1×10^{-7} 台のリプル成分が多く存在することであるので、これらを減らす対策が必要である。
- パターン出力時の追従性
 - フラットボトム 1×10^{-4} 台のオフセットについて、原因調査を行う。
 - Main-PSとSub-PSの出力電圧分担の見直し(電圧パターン最適化)をまず行い、電流追従性の最適化を行う。
 - MRTンネル内の磁場測定を電流パターン出力のトリガと同期させ、磁場パターンの追従性測定を行う。
- 長時間の安定性
 - 今のところ3時間程度の連続パターン通電が最長である。
 - 連続通電時間を延ばすと共に、受電系統の変動による影響の大きさを測定する。
- 電源の周波数応答性
 - シミュレーションでは1kHz程度の帯域が見込まれるが、実機での応答測定を行う。
- ノイズ対策による外部への遮断効果
 - 電源自体をファラデーケージ化して、外部へのノイズ電磁波を減らすことを目指した。
 - 電源動作時の空間電磁波の測定を行い、コンタクトフィンガー等の対策がどの程度効果を上げたか測定する。