

放射光源で必要なDC 電磁石電源

OH0' 25 @KEK, つくば

2025/9/2

(現) Photon factory RF グループ

(元) J-PARC 主リング 電磁石/電源グループ

内藤 大地



1. この講義の目標

- DC電磁石電源:
 - 電磁石のコイルに電流を流し、磁場を励磁する装置。
- **電磁石電源の性能が、放射光源にどのような影響があるかを理解する。**
 2. 何故電磁石磁場の安定性が必要か？
 3. 電磁石電源出力電流と磁場の関係
 4. 磁場リップルと電子軌道変動の関係
- **高安定な電源を実現するために必要なエッセンスを理解する。**
 5. 高安定DC電源のデザイン
 - 5.1 高精度電流測定回路
 - 5.2 全波整流器+DC/DCコンバータ(type1電源)
 - 5.3 三相PWMコンバータ(type2電源)
 - 5.4 type1電源とtype2電源の比較
 - 5.5 高安定DC電磁石用電源の例(PF新四極/六極用電磁石)

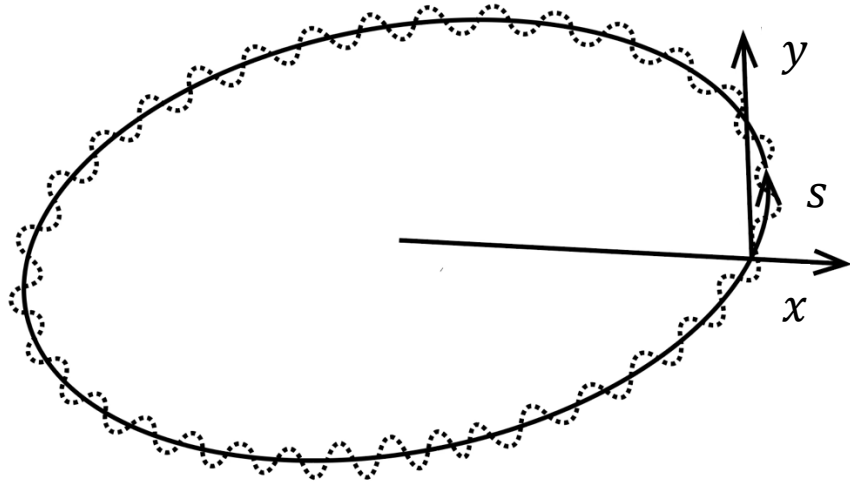
2.何故電磁石磁場の安定性が必要か？

2.1 電磁石磁場と電子軌道の関係

2.2 磁場変動と放射光の強度変動

2.1 電磁石磁場と電子軌道の関係

<座標系と荷電粒子の運動>



- 荷電粒子は加速器中で特定の楕円軌道の周囲を振動しながら進む。

$$\frac{d^2x}{ds^2} - \frac{\rho + x}{\rho^2} + \left(1 + \frac{\rho}{x}\right)^2 \frac{B(s) + K(s)x}{B\rho} = 0$$
$$\frac{d^2y}{ds^2} - \left(1 + \frac{\rho}{x}\right)^2 \frac{K(s)y}{B\rho} = 0$$

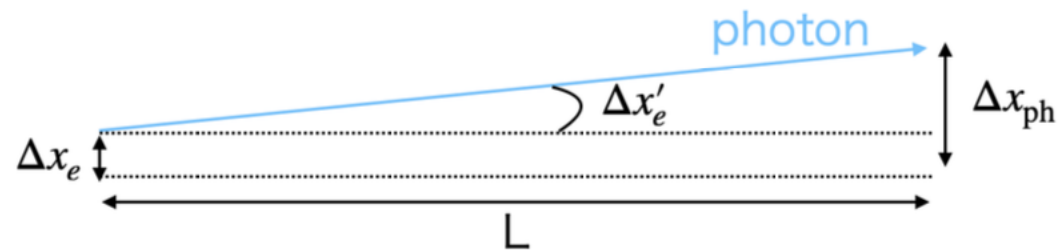
B : 偏向電磁石磁場
 K : 四極電磁石磁場勾配
 ρ : 曲率半径

- 電磁石磁場の強さが電子の軌道を決める。
 - 磁場が変動すると各場所での電子の軌道と軌道の傾きも変動してしまう。

2.2 磁場変動と放射光の強度変動

- 放射光源では発光点から実験エリアまで放射光を導き(ビームラインと呼ぶ)、試料に照射する。
- 発光点の種類：
 - 偏向電磁石
 - 挿入光源 (アンジュレーター、ウィグラー)

<簡略化した発光点のずれ>



- 照射点での光の位置ずれ(Δx_{ph}):

$$\Delta x_{ph} = \Delta x_e + L\Delta x'_e$$

Δx_e : 電子の軌道ずれ
 $\Delta x'_e$: 電子軌道の傾きのずれ
 L : ビームラインの長さ

- ビームラインが30 m、照射点での光のサイズが1 mmの時、照射点での位置が1 mmずれるには...

$$\Delta x'_e \sim \tan^{-1} \left(\frac{\Delta x_{ph}}{L} \right) = 33 \text{ } \mu\text{rad}$$

- 光の形状がガウス分布だと仮定した際の光強度の減少割合(ΔI_{photon})は

$$\Delta I_{photon} = 1 - \exp \left(-\frac{1}{2} \right) = 0.39$$

回折限界光源での発光点での
電子ビームの安定性に対する要求の例 [1]。

項目	安定性
光軸のずれ	ビームサイズの5%以下
光軸の傾き	ビーム広がり5%以下
ビームサイズ	ビームサイズの0.1%以下
ビーム広がり	ビーム広がり0.1%以下

小さな軌道ずれが大きな光強度変動を生んでしまう!

3.電磁石電源電流と磁場の関係

- 3.1 電磁石電源と電磁石の接続例 (PF 2.5 GeVリングの場合)
- 3.2 加速器中での磁場リップル

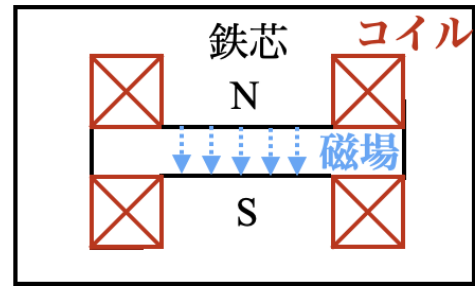
3.1 電磁石電源と電磁石の接続例(PFリングの場合)

- 加速器では磁場の大きさが同じ電磁石は直列に接続される(ファミリーと呼ぶ)。
 - **電源出力電流: 必要な磁場の強さから決定(磁場強度 $\propto$ 電源出力電流値、後述)。**
 - **電源出力電圧: 電源出力電流 $\times$ (配線抵抗+電磁石の抵抗)から決定。**
- 電磁石の等価回路はコイルのインダクタンス、コイルの抵抗、コイルと鉄心間の寄生容量で現させる(詳しくはOHO'10 中村 衆氏のテキスト参照)。
 - **電源を繋いだ時にLCR共振を起こす可能性がある。**
=>事前のシミュレーションが重要。
 - 個々の電磁石はローパスのように振る舞う(カットオフ周波数は $1/(2\pi\sqrt{LC})$)。
=> **カットオフ周波数より高い電流変動は減衰され、磁場リップルにはならない。**

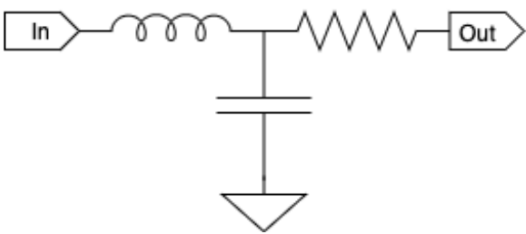
<PF 2.5 GeVリングの電磁石と電源>

ファミリー	電磁石数	電圧	電流
BM	28	800V	1200A
Q1	4	110V	600A
Q2	4	50V	350A
Q3	8	180V	800A
Q4	8	180V	800A
Q5A	2	60V	600A
Q5B	2	60V	600A
Q6A	2	60V	600A
Q7A	2	60V	600A
Q7B	2	60V	600A
Q8A	2	60V	600A
Q8B	2	60V	600A
Q9A	2	60V	550A
Q9B	2	60V	600A
QAA	2	45V	450A
QAB	2	50V	350A
QFD	4	140V	650A
QFF	6	140V	650A
QFA	2	50V	630A
QFB	2	50V	550A
QD	12	150V	650A
QDA	2	150V	650A
QDB	2	50V	700A
SFF	8	160V	300A
SFD	8	160V	300A
SD	16	160V	300A

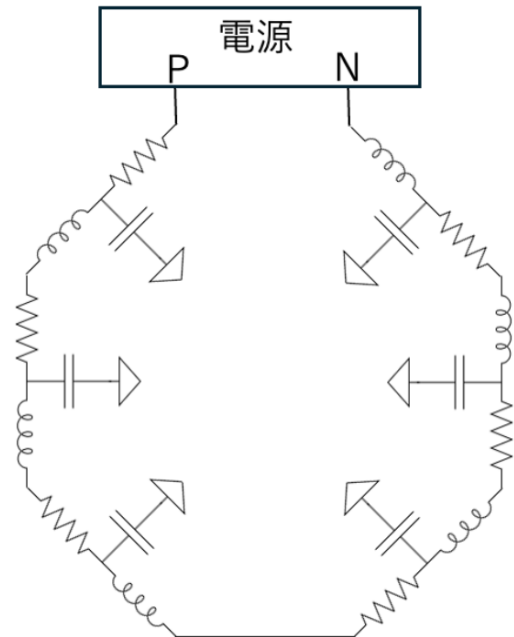
<偏向電磁石の概略図>



<電磁石の等価回路>



<電磁石の接続例>

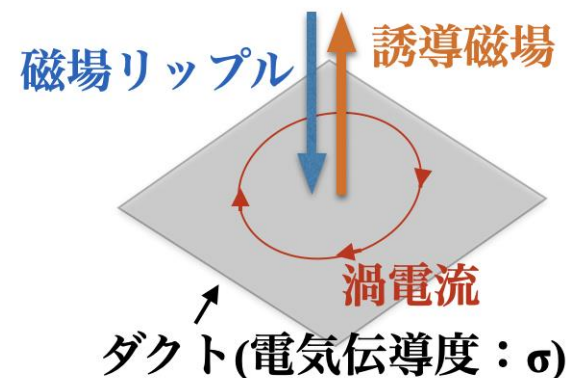


<それぞれの要素の値>

パラメーター	値
インダクタンス	$10^{-4} \sim 10^{-2}$ H
抵抗値	$10^{-4} \sim 10^{-3}$ Ω
寄生容量	$10^{-9} \sim 10^{-8}$ F
カットオフ周波数	～数十 kHz

3.2 加速器中の磁場リップル 1

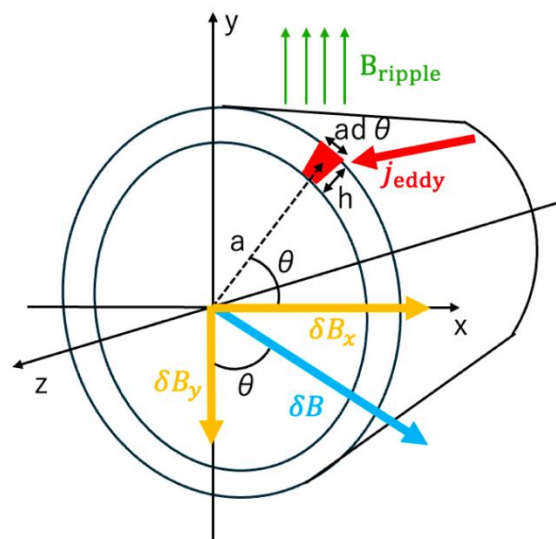
<渦電流と磁場>



- ・ 加速器中では荷電粒子は金属のダクト中を走る。
 - 電源電流変動により電磁石磁場の変動が起きると、ダクトに渦電流が流れる。
 - 磁場変動を打ち消すように誘導磁場が発生する。
- => **ダクト中心付近の電子が感じる磁場変動は減衰する。**

- ・ 本講義では簡単のため、電磁石中に円筒ダクトが置かれた場合を考える。
- ・ マクスウェル方程式から磁場リップルのz方向ベクトルポテンシャル($A_{\text{ripple}}(t)$ とおく)と、渦電流によるz方向ベクトルポテンシャル($A_{\text{eddy}}(t)$ とおく)が満たす方程式は

偏向電磁石中に円筒ダクトが置かれた場合の渦電流



$$A_{\text{eddy}}(t) = -\frac{\mu_0 h a \sigma}{n} \cdot \frac{\partial}{\partial t} (A_{\text{eddy}}(t) + A_{\text{ripple}}(t)) \quad [2]$$

ベクトルポテンシャル: $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$

μ_0 : 真空透磁率
 h : ダクトの厚み
 a : ダクト半径
 n : 磁極数

=> ある時刻のダクト表面の磁場変動が作り出す渦電流が誘導磁場を作り出す。
 (この時、ベクトルポテンシャルのxy成分は0)

- ・ y方向磁場リップルが $B_{\text{ripple}}(t) = B_{\text{ripple}} \sin(2\pi f t)$ と書ける時、y方向の誘導磁場は
- $$B_{\text{eddy}}(t) = -B_{\text{ripple}} \sin \varphi \cos(2\pi f t - \varphi), \text{ with } \tan \varphi = 2\pi f \cdot \frac{\mu_0 h a \sigma}{n}$$
- ・ ビーム中心付近でのy方向磁場は

$$B(t) = B_{\text{ripple}}(t) + B_{\text{eddy}}(t) = \frac{B_{\text{ripple}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi f \mu_0 h a \sigma}{n/2}\right)^2}} \sin(2\pi f t - \varphi)$$

[2] R.E. Shafer, Fermilab report TM-991

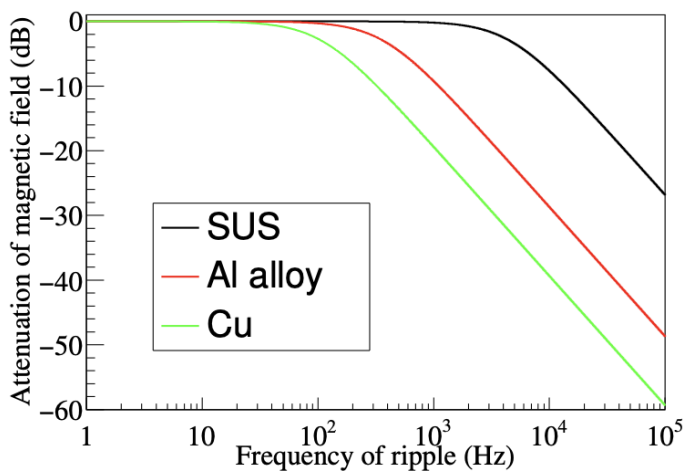
3.2 加速器中の磁場リップル 2 (磁場減衰の具体例)

$$B(t) = B_{\text{ripple}}(t) + B_{\text{eddy}}(t) = \frac{B_{\text{ripple}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi f \mu_0 h a \sigma}{n/2}\right)^2}} \sin(2\pi f t - \varphi)$$

μ_0 : 真空透磁率
 h : ダクトの厚み
 a : ダクト半径
 n : 磁極数

- PFとおおよそ大きさが同じ、厚さ2 mm、半径20 mmのダクトの場合の磁場減衰率を計算してみる。
- 偏向電磁石($n = 2$)の場合:
 - 一番カットオフ周波数が高いステンレス合金でも、電磁石のLCによる減衰のカットオフ周波数の1/10以下。
=> **電磁石電源で気にしないといけない電流リップルの周波数はダクトの材質と形状で決まる。**
 - 回折限界光源ではダクト半径が10 mm程度なので、PFリングよりも2倍高い周波数まで気にしないといけない。
- 偏向電磁石($n = 4$)の場合:
 - カットオフ周波数が偏向電磁石の2倍程度となるので、より高い周波数まで気にしないといけない。

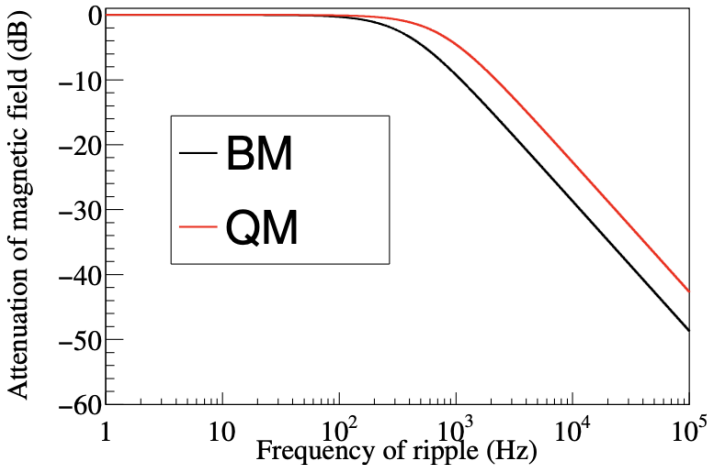
様々な材質の円筒ダクトによる
偏向電磁石磁場減衰



様々な材質の円筒ダクトによる
偏向電磁石磁場のカットオフ
周波数(-3dB減衰した地点)

材質	カットオフ周波数
ステンレス鋼	4.55 kHz
アルミ合金	0.37 kHz
銅	0.11 kHz

アルミ合金ダクトでの
磁場減衰の比較



3.3 ここまでのまとめ

- 加速器では磁場の大きさが同じ電磁石は直列に接続される(ファミリーと呼ぶ)。
 - 電源出力電流: 必要な磁場の強さから決定 (磁場強度 $\propto$ 電源出力電流値、後述)。
 - 電源出力電圧: 電源出力電流 $\times$ (配線抵抗+電磁石の抵抗) から決定。
- 電源と電磁石はLCRネットワークを構成する。
 - 共振による電源出力電流のリップル増大に注意が必要。
- 電流リップルにより生じた磁場リップルは、ビームダクトに発生する誘導磁場で減衰される。
 - 電磁石電源で気にしないといけない電流リップルの周波数はダクトの材質と形状で決まる。

4. 電流リップルと電子軌道変動

4.1 偏向電磁石による軌道のずれ

4.2 偏向電磁石による軌道の傾きずれ

4.3 偏向電磁石によるビームサイズ変動

4.4 偏向電磁石によるビーム広がり変動

※ 四極電磁石の影響についてはテキスト参照

回折限界光源での発光点での
電子ビームの安定性に対する要求の例

項目	安定性
光軸のずれ	ビームサイズの 5%以下
光軸の傾き	ビーム広がり の 5%以下
ビームサイズ	ビームサイズの 0.1%以下
ビーム広がり	ビーム広がり の 0.1%以下

- ・ この講義では電源の出力電流リップルの周波数はビームの周回周波数よりも十分遅く、ビームから見るとリング一周中は磁場の変動がない場合を取り扱う。
- ・ 全ての偏向電磁石が一台の電源で駆動させる場合を取り扱う

4.1 偏向電磁石による軌道のずれ1 (運動方程式)

- ここでは簡単のためにリング内の全ての偏向電磁石を一台の電源で駆動する場合を考える。
- (おさらい) 電子の運動が従う方程式は

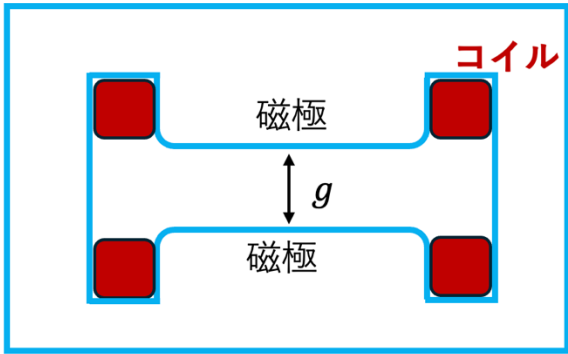
$$\frac{d^2x}{ds^2} - \frac{\rho + x}{\rho^2} + \left(1 + \frac{\rho}{x}\right)^2 \frac{B(s) + K(s)x}{B\rho} = 0$$

$$\frac{d^2y}{ds^2} - \left(1 + \frac{\rho}{x}\right)^2 \frac{K(s)y}{B\rho} = 0$$

B : 偏向電磁石磁場
 K : 四極電磁石磁場勾配
 ρ : 曲率半径

- 偏向電磁石の磁場: $B = \frac{\mu_0}{g} NI$

<偏向電磁石の概略図>



<PFの場合のパラメータ>

シンボル	定義	値
B	磁場	1.02 T
μ_0	真空透磁率	$4\pi e^{-7}$ H/m
g	磁極間ギャップ	70 mm
N	コイルのターン数	48
I	コイルに流れる電流	1200 A

- 電流が $I + \Delta I$ と変動した時(ただし $\Delta I \ll I$)、

$$\frac{d^2x}{ds^2} + \left(\frac{1}{\rho^2} + \frac{K(s)}{B\rho}\right) \cdot x = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta I}{I}$$

4.1 偏向電磁石による軌道のずれ2 (軌道変化)

- ・ 電流が $I + \Delta I$ と変動した時(ただし $\Delta I \ll I$)、

$$\frac{d^2x}{ds^2} + \left(\frac{1}{\rho^2} + \frac{K(s)}{B\rho} \right) \cdot x = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta I}{I}$$

- ・ 運動量が $p + \Delta p$ の電子が従う運動方程式 (ただし $\Delta p \ll p$)

$$\frac{d^2x}{ds^2} + \left(\frac{1}{\rho^2} + \frac{K(s)}{B\rho} \right) \cdot x = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{p}$$

- ・ 電流が変動した時の運動方程式は、運動量がずれた電子の運動方程式と全く同じ形をしている!

=> 加速器オブティクス中の分散がある場所で電子軌道のズレが発生する。

- ・ 軌道の変化量($\Delta x(s)$ とおく)は分散関数($D(s)$ とおく)を用いて

$$\Delta x(s) = -\frac{\Delta I}{I} D(s)$$

電流リップルの大きさに比例して軌道のずれが大きくなる。

4.1 偏向電磁石による軌道のずれ3 (上限値)

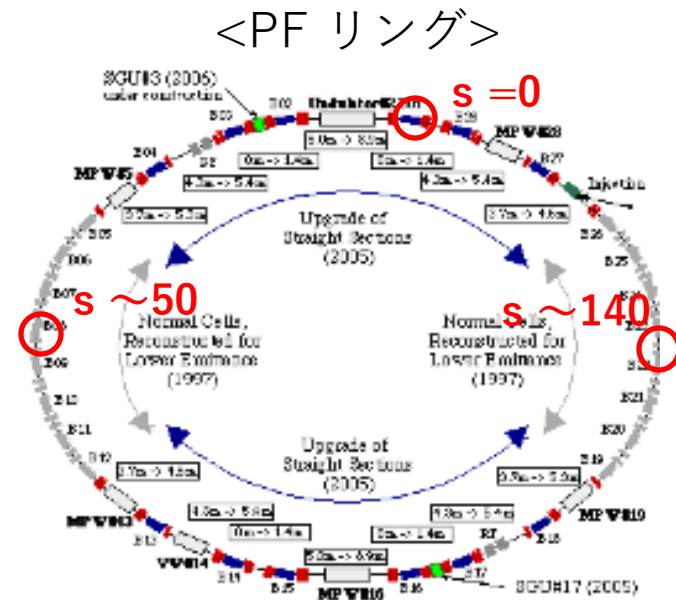
- ・ 具体的にどれくらいまで電流リップルを抑えれば良いか、具体的に計算してみる。
- ・ 軌道のズレの許容値(回折限界光源の場合)：ビームサイズの5 %以下

・ 水平ビームサイズ： $\sqrt{\beta_x(s)\varepsilon_x}$

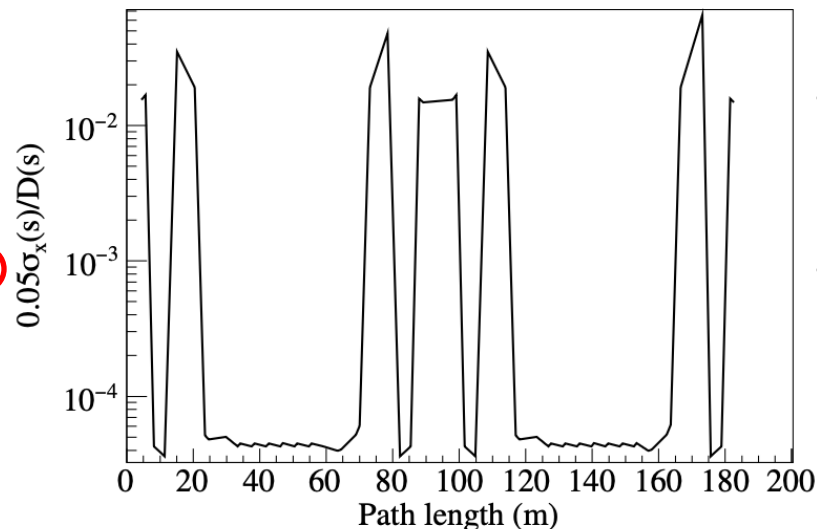
$\beta_x(s)$: ベータ関数
 ε_x : 横エミッタンス

- ・ 軌道ずれの許容値は

$$\frac{|\Delta I|}{I} D(s) < 0.05 \times \sqrt{\beta_x(s)\varepsilon_x} \Rightarrow \frac{|\Delta I|}{I} < 0.05 \times \frac{\sqrt{\beta_x(s)\varepsilon_x}}{D(s)}$$



<SADで計算した $\Delta I/I$ の上限値>



- ・ SAD(軌道計算プログラム)を用いてPFのリング1周にわたって分散とビームサイズを計算。
=> $\Delta I/I$ の上限値を計算。
- ・ PFリングのオプティクスで回折限界光源の要求を満たすには、電流リップルを40 ppm以下に抑えないといけない。

4.2 偏向電磁石による軌道の傾きずれ

- 軌道の傾きずれ=>軌道のズレをs(ビーム進行方向)で微分すれば良い。

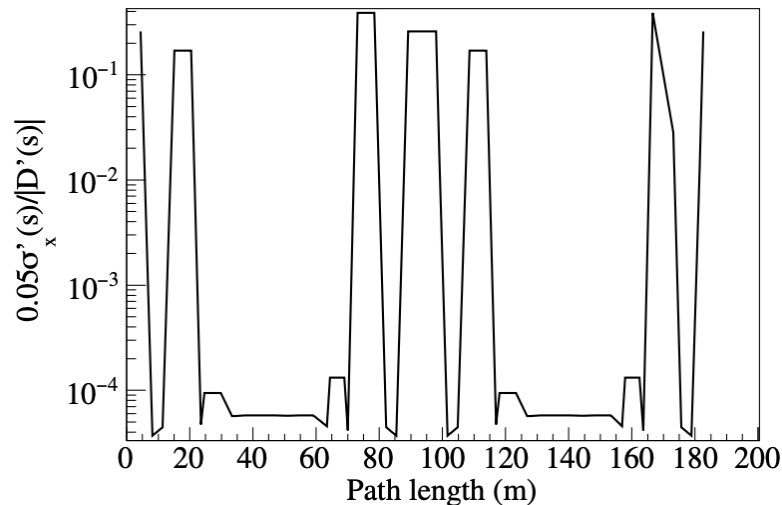
$$\Delta x'(s) = -\frac{\Delta I}{I} D'(s)$$

- 軌道の傾きずれも電流リップルの大きさに比例する。
- 傾きずれの許容値(回折限界光源の場合): ビーム広がり の5 %以下

- 水平ビーム広がり(詳しくはテキスト参照): $\sqrt{\gamma_x(s)\varepsilon_x}$ $\gamma_x(s)$: ガンマ関数
- 軌道の傾きずれの許容値は

$$\frac{|\Delta I|}{I} |D'(s)| < 0.05 \times \sqrt{\gamma_x(s)\varepsilon_x} \Rightarrow \frac{|\Delta I|}{I} < 0.05 \times \frac{\sqrt{\gamma_x(s)\varepsilon_x}}{|D'(s)|}$$

<SADで計算した $\Delta I/I$ の上限値>



- SAD(軌道計算プログラム)を用いてPFのリング1周にわたって分散の微分とビーム広がりを計算。
=> $\Delta I/I$ の上限値を計算。
- PFリングのオプティクスで回折限界光源の要求を満たすには、電流リップルを41 ppm以下に抑えないといけない。

4.3 偏向電磁石によるビームサイズ変動 1 (β 関数のずれ)

- ・ビームサイズの変動は六極電磁石の位置での軌道ずれによるベータ関数のずれから起きる。
- ・六極電磁石磁場:

$$B_x = \frac{6\mu_0}{r_b^3} N_{SM} I_{SM} \cdot xy$$

$$B_y = \frac{3\mu_0}{r_b^3} N_{SM} I_{SM} \cdot (x^2 - y^2)$$

μ_0 : 真空透磁率

r_b : 中心から磁極までの距離(ボア径)

N_{SM} : ターン数

I_{SM} : コイルに流す電流

- ・位置が $x + \Delta x$ ずれた時に六極磁場:

$$B_x = \frac{6\mu_0}{r_b^3} N_{SM} I_{SM} \cdot (\Delta x \cdot y + xy)$$

$$B_y \sim \frac{3\mu_0}{r_b^3} N_{SM} I_{SM} \cdot (2\Delta x \cdot x + x^2 - y^2)$$

- ・六極電磁石内で軌道のズレが発生すると四極磁場が発生する。

- ・発生する四極の磁場勾配($\Delta K_1(s)$ とおく)は

$$\Delta K_1(s) = \frac{6\mu_0}{r_b^3} N_{SM} I_{SM} \cdot \Delta x = -\frac{6\mu_0}{r_b^3} N_{SM} I_{SM} \cdot D(s) \frac{\Delta I}{I}$$

- ・ベータ関数のずれ($\Delta\beta(s)$ とおく)は

$$\begin{aligned} \Delta\beta(s) &= -\frac{\beta(s)}{2 \sin 2\pi\nu} \oint \beta(s_1) \Delta K_1(s_1) \cos 2(\pi\nu - |\phi(s_1) - \phi(s)|) ds_1 \\ &= \delta(s) \cdot \frac{\Delta I}{I} \end{aligned}$$

4.3 偏向電磁石によるビームサイズ変動 2 (上限値)

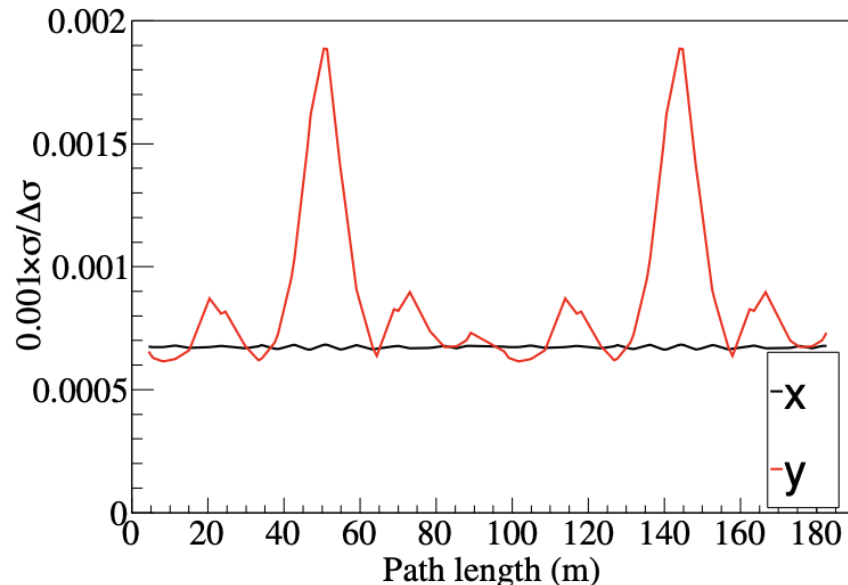
- ビームサイズの変動 ($\Delta\sigma(s)$ とおく) :

$$\Delta\sigma(s) = \sqrt{(\beta(s) + \Delta\beta(s))\varepsilon} - \sqrt{\beta(s)\varepsilon} \sim \frac{\Delta\beta(s)}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\beta(s)}} = \frac{\Delta I}{I} \cdot \frac{\delta(s)}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\beta(s)}}$$

- ビームサイズの変動も電流リップルに比例する。
- ビームサイズ変動の許容値(回折限界光源の場合): ビームサイズの0.1 %

$$|\Delta\sigma(s)| < 1 \times 10^{-3} \cdot \sqrt{\beta(s)\varepsilon}$$
$$\frac{|\Delta I|}{I} < 1 \times 10^{-3} \cdot \frac{2\beta(s)}{\delta(s)}$$

<SADで計算した $\Delta I/I$ の上限値>



- これまでと同様にSAD(軌道計算プログラム)を用いて $\delta(s)$ を計算。
=> $\Delta I/I$ の上限値を計算。
- PFリングのオプティクスで回折限界光源の要求を満たすには、
電流リップルを600 ppm以下に抑えないといけない。

4.4 ビーム広がりの変動

- ビーム広がりの変動 ($\Delta\sigma'(s)$ とおく):

$$\Delta'\sigma(s) = \sqrt{(\gamma(s) + \Delta\gamma(s))\varepsilon} - \sqrt{\gamma(s)\varepsilon} \sim \frac{\Delta\gamma(s)}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\gamma(s)}} = \frac{\Delta I}{I} \cdot \frac{G(s)}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\gamma(s)}}$$

$$\Delta\gamma(s) \sim -\frac{\Delta\beta(s)}{\beta(s)}\gamma(s) + \frac{\beta'(s)\Delta\beta'(s)}{2\beta(s)} = G(s) \cdot \frac{\Delta I}{I}$$

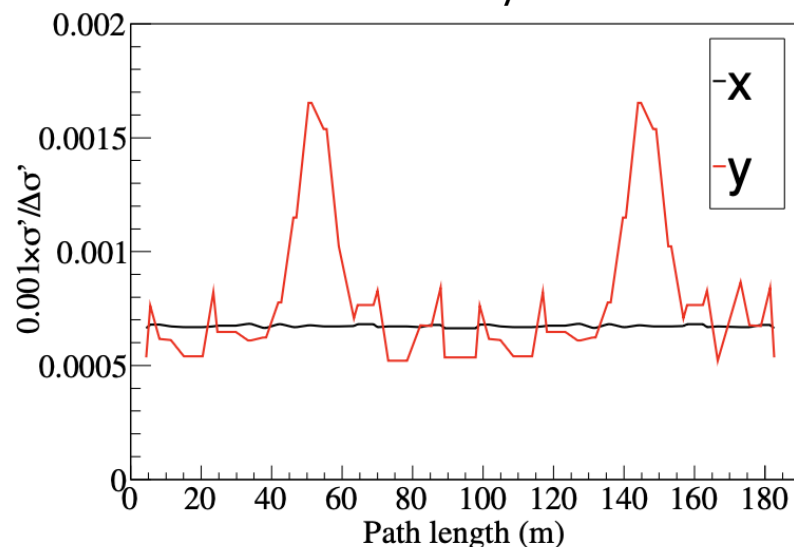
- ビーム広がりの変動も電流リップルに比例する。

- ビーム広がり の許容値(回折限界光源の場合): ビーム広がり の0.1 %

$$|\Delta\sigma'(s)| < 1 \times 10^{-3} \cdot \sqrt{\gamma(s)\varepsilon}$$

$$\frac{|\Delta I|}{I} < 1 \times 10^{-3} \cdot \frac{2\gamma(s)}{G(s)}$$

<SADで計算した $\Delta I/I$ の上限値>



- これまでと同様にSAD(軌道計算プログラム)を用いて $\delta(s)$ を計算。
=> $\Delta I/I$ の上限値を計算。
- PFリングのオプティクスで回折限界光源の要求を満たすには、
電流リップルを540 ppm以下に抑えないといけない。

4.5 ここまでのまとめ

- ・ 四極電磁石の場合(詳しくはテキスト参照) :
 - 電流リップルによって新たに ΔK の磁場勾配が発生。
 - 偏向電磁石の場合と同様にビームサイズとビーム広がりの変動が起こる。
- ・ **試料位置での光強度変動を起こす項目の全てが電流リップルの大きさに比例する。**
- ・ PFのオプティクスで計算した上限値と、実際の回折限界光源での上限値との比較 :
 - ・ 軌道のズレと傾きの変動 :
 - 上限値が $\sqrt{\epsilon}$ に比例するのでエミッタンスの分だけ上限値が小さくなる。
 - ・ ビームサイズとビーム広がりの変動 :
 - エミッタンスに依らないので、大きくは変化しないだろう。

PFのオプティクスを仮定した時の電流リップル上限値

項目	BM	QM
軌道のズレ	40 ppm	-
軌道の傾きズレ	41 ppm	-
ビームサイズ変動	600 ppm	23 ppm
ビーム広がり変動	540 ppm	21 ppm

回折限界光源での電流リップル上限値

施設名	BM	QM
PAS-U	10 ppm	10 ppm
DIAMOND-II	10 ppm	10 ppm
HEPS	10 ppm	10 ppm
SLS-II	15 ppm	20 ppm

最先端の放射光源では～10 ppmという非常に小さい電流リップルしか許されない！

5. 高安定DC電源のデザイン

5.1 高精度電流測定回路

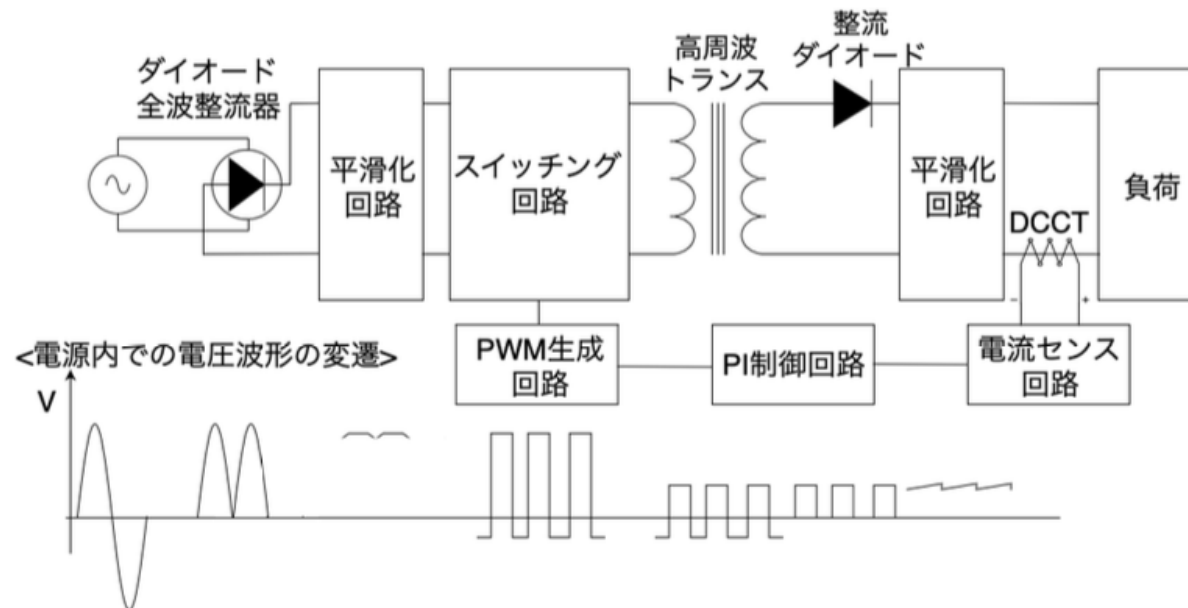
5.2 全波整流器+DC/DCコンバータ(type1電源)

5.3 三相PWMコンバータ(type2電源)

5.4 type1電源とtype2電源の比較

5.5 高安定DC電磁石用電源の例(PF新四極/六極用電磁石)

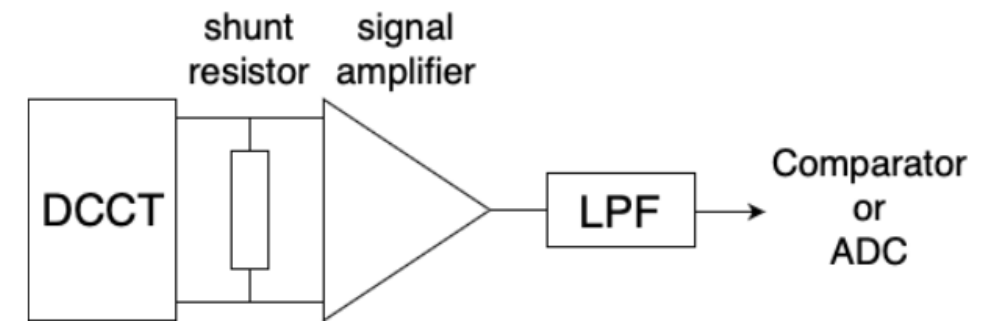
<高安定電源の構成例>



5.1 高精度電流測定回路

- 高精度電流測定回路:
 - 出力電流安定化フィードバック制御の入力値として使用。
 - **高安定DC電源の要。**
- DCCT:
 - 電源の出力電流を非接触で検出、検出した電流値に比例した電流を出力する。
 - ~ 1 ppmが現状で達成できる最高精度。
=> DCCTの性能がDC電源で達成可能な性能を決める。
- ショント抵抗:
 - DCCTの出力を電圧に変換する。
 - **温度特性が良い抵抗でも10 ppm/°C程度の変化があるので、恒温槽等で温度管理する必要がある。**
 - 自分自身の発熱が問題とならないよう、小さい必要がある(数 Ω 程度)。
- 信号増幅器:
 - ショント抵抗で検出する電圧は小さいので、増幅する必要がある。
 - ショント抵抗と同じく、恒温槽等で温度管理する必要がある。
- アナログ制御の場合の信号の行き先: コンパレータへ
- デジタル制御の場合の信号の行き先: 高精度ADCで電圧検出

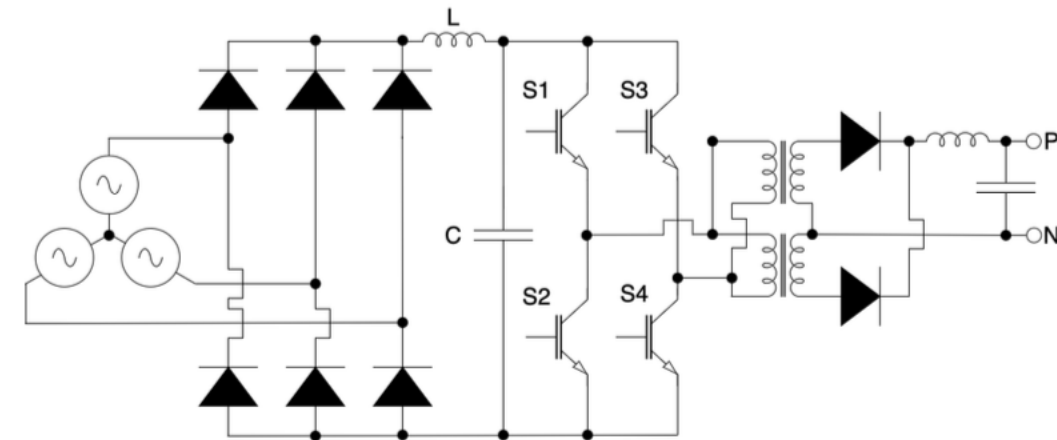
<DCCTを使用する場合の読み出し回路の例>



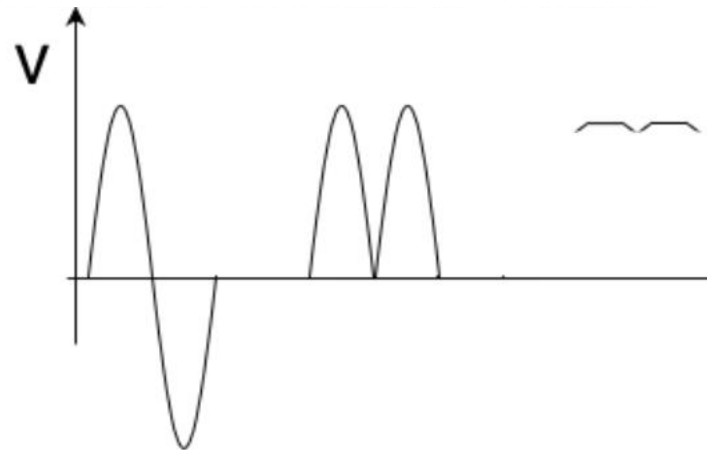
5.2 全波整流器+DC/DCコンバータ(type 1電源)

- 全波整流器+平滑化回路:
 - 三相交流をDC電圧に変換する。
 - 全波整流器で生じるリップルを消す。
- DC/DCコンバータ:
 - Pulse Width Modulation (PWM)を用いて出力電流を安定化する。
- DC/DCコンバータでのPWM制御の例(位相シフトPWM制御):
 - S1とS2に対してS3とS4のオン/オフタイミングをずらし、出力電圧の幅を制御。
 - タイミングのずれが大きくなるほど、出力電圧幅が増大。
 - スwitchingの繰り返し周波数とその高調波が電流リップルとなる。
- 最終段の平滑化回路:
 - PWMを平滑化してDC電圧に変換する。
 - PWMのスイッチングリップルを消す。

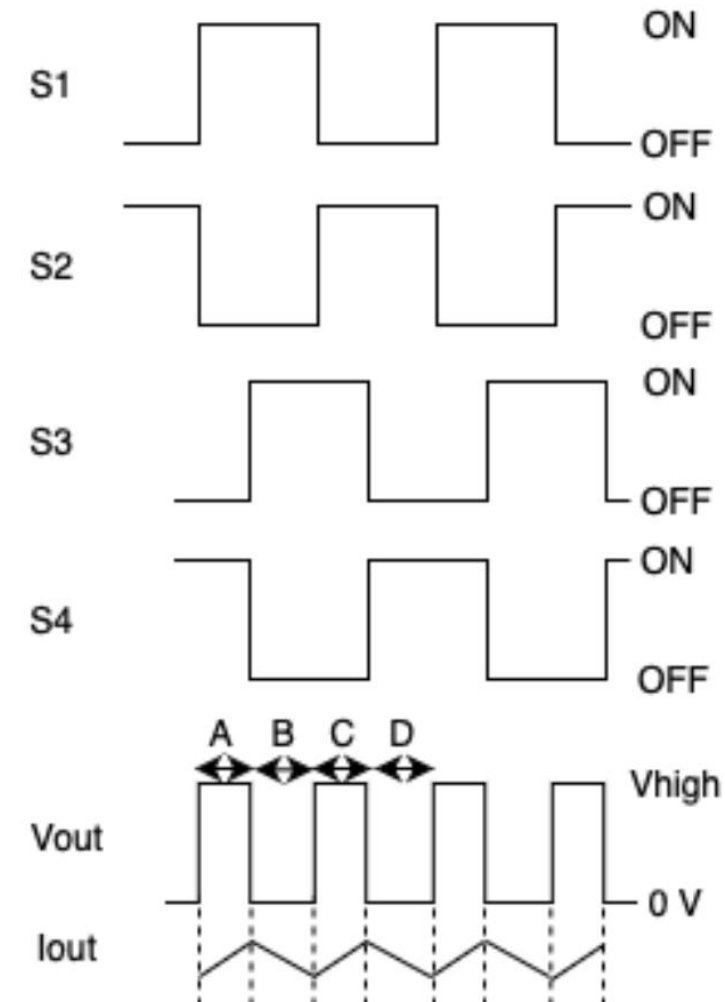
<Type1電源の最小構成要素>



<全波整流のイメージ>



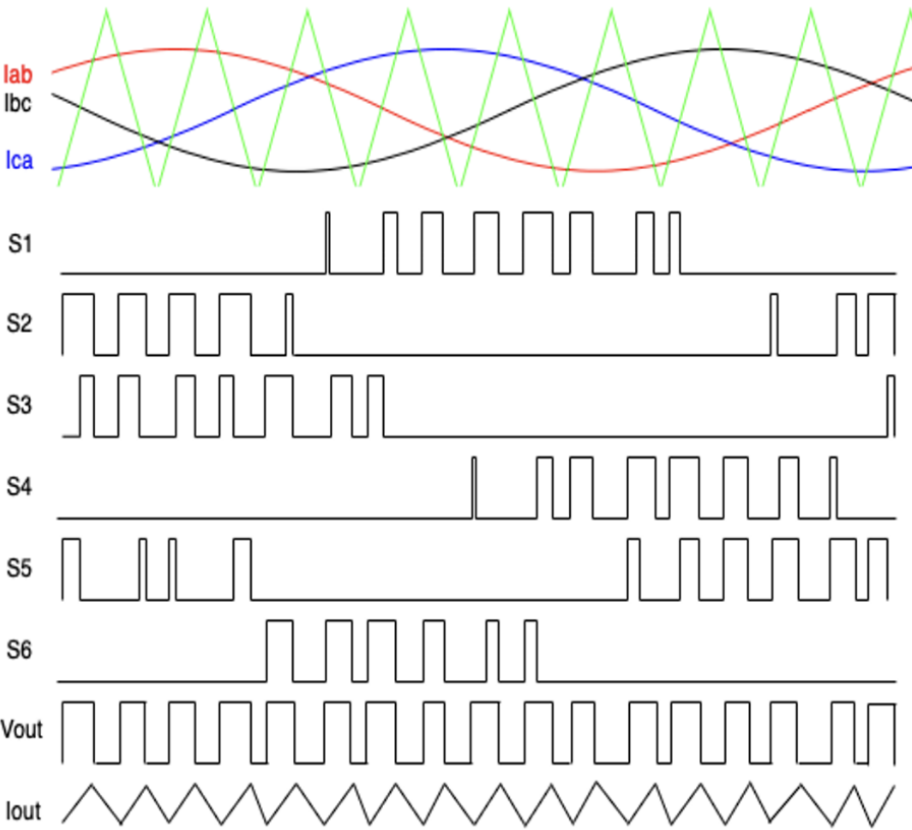
スイッチのオン/オフ
タイミングと出力電圧



5.3 三相PWMコンバータ(type 2電源)

- 三相PWMコンバータの制御方法:
 - 三角波と3つの電流指令値 (I_{ab}, I_{bc}, I_{ca})を比較し、三角波より大きい電流値の種類に応じてスイッチをオン。
 - 電流指令値の大きさを変えることで出力電圧の幅を制御。
 - 出力電流だけでなく、出力電圧を一定にするように制御することで電力効率(力率)を制御。
=>非常に高い電力効率を達成できる。

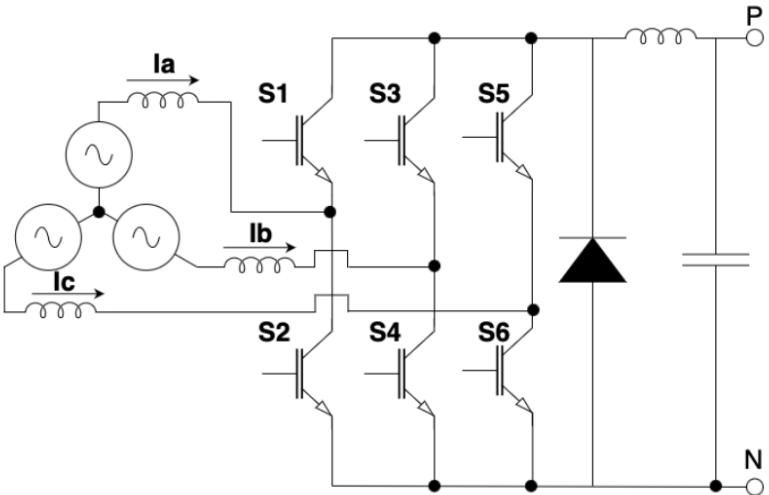
<PWM制御のダイアグラム>



<オン条件の例>

Highの電流	オンスイッチ
I_{ab}	S2, S3
I_{bc}	S4, S5
I_{ca}	S1, S6
$I_{ab} \ \& \ I_{bc}$	S2, S5
$I_{ab} \ \& \ I_{ca}$	S3, S6
$I_{bc} \ \& \ I_{ca}$	S1, S4
$I_{ab} \ \& \ I_{bc} \ \& \ I_{ca}$	なし
Nothing	なし

<三相PWMコンバータの最小構成要素>



5.4 Type 1電源とType 2電源の比較

- Type 1電源(全波整流器+DC/DCコンバータ)のメリット:
 - 制御ロジックが比較的簡単。
 - サイズが小さい。
- Type 1電源のデメリット
 - 全波整流器(ダイオード)の発熱の問題で出力可能な電力が制限される。
 - 出力電流値によって一番電力効率が高い回路定数が変わる。
- Type 2電源(三相PWMコンバータ)のメリット:
 - 大出力が可能。
 - どのような出力電流でも高い電力効率が達成できる。
- Type 2電源のデメリット:
 - 制御ロジックが複雑。
 - Type 1電源と比べてサイズが大きい。
- 加速器での使用例:
 - 比較的输出電力が小さい場合 (PF等): Type 1電源を使用。
 - 出力電力が大きい場合(J-PARC 等): Type 2電源の後段にDC/DCコンバータを接続して使用。
- コストを度外視すれば、全ての電磁石を個別のType1電源で制御するのが理想。
 - n台の電磁石を1台の電源で制御する場合よりも光強度の変動に与える影響が $1/\sqrt{n}$ になるため(電源の電流リップルの大きさが同じ場合)。

<Type1電源tpType2電源の比較>

項目	Type1	Type2
出力可能電力	数十 kVA	1 MVA も可能
電力効率	80~90 %	~99 %
制御方式	アナログ可	要デジタル
FB ゲイン	大	中
開発難度	ほどほど	高
サイズ	小	大
コスト	ほどほど	大

高安定DC電磁石用電源の例(PF新四極/六極用電磁石)

Web 版では未掲載

6. 講義のまとめ

- 電磁石電源の性能が、放射光源にどのような影響があるか？
 - 電源出力電流リップルによって電子軌道とビームサイズが変動。
=>照射点での光強度が変動する。
 - 気にしなければならない電流リップルの周波数はダクトの材質と形状で決まる。
 - **世界最先端の光源(回折限界光源)では電流リップル 10 ppm以下以下が求められる。**
- 高安定な電源を実現するために必要なエッセンスは？
 - 電源出力電流を高安定/高精度で検出する必要あり。
 - 加速器では全波整流器+DC/DCコンバータや三相PWMコンバータで実現。
- **PFの新四極/六極用電磁石用電源では全波整流器+DC/DCコンバータの構成で、世界最先端の加速器でも通用する性能を実現。**