

小型トカマク用デジタル制御 垂直磁場発生回路

水野保則

(工学部 電気・電子工学科)

abstract

我々は小型トカマクHAMANA-Tにおいて、トーラスプラズマの位置制御の研究を行っている。装置が小型のため、大型装置の制御回路をそのまま流用することはできない。また、その電源の小型化も問題となる。そこで、コンデンサ電源をユニット化し、これをデジタル的に放電することによって、制御電流を生じるデジタル制御垂直磁場発生回路を考案し、良好な結果を得た。この回路を紹介する。

1. はじめに

トカマク装置の制御垂直磁場電源は、サイリスタやトランジスタによるPWM制御やインバータ制御が一般に採用されている。しかし、これらは大型トカマク用の制御垂直磁場電源として考案されているため、そのまま小型トカマク(HAMANA-T)に採用することはできない。また、HAMANA-Tの制御垂直磁場の最大電流は40Aに達するため小電力トランジスタを複数個並列接続するか、大電流トランジスタを使用する必要がある。しかし、複数個並列接続の場合コレクタ電流の均等化が、大電流トランジスタの場合コレクタ電流上昇に伴うhFEの減少がそれぞれ問題となる。そこで、トランジスタ、コンデンサ、コンパレータ、保護抵抗より構成される定電流ユニットを複数接続するデジタル制御垂直磁場発生回路(ドライブ)を設計製作した。このドライブをHAMANA-Tに取り付け動作させた結果、安定な制御垂直磁場が得られ、プラズマ水平位置制御において良好な結果を得た。

2. プラズマ水平位置制御

HAMANA-Tは、変流器脚鉄の周りのステンレス製トーラス真空容器、これを取り囲むように配置された20個のトロイダル磁場巻線、真空容器の上下に配置された変流器一次巻線、水平磁場巻線、基本垂直磁場巻線、制御垂直磁場巻線および排気装置からなる。ログスキーコイルが真空容器外側周囲に、2個の磁気プローブが小半径6cm、ポロイダル角 $\theta = 0, \pi$ の位置に計測センサとして、それぞれ配置されている。ログスキーコイル、磁気プローブからの一連のプラズマ位置信号電圧は、積分回路、演算回路、PID制御回路を介しドライブに入力される。ドライブの出力電流は、制御垂直磁場巻線に導かれ制御垂直磁場を発生する。

3. ドライブ回路

ドライブの基本回路はコンパレータCMP、充放電コンデンサC、トランジスタTrおよび保護抵抗Rからなる。図1に基本回路正負3段ずつからなるドライブ回路を示す。制御垂直磁場巻線VFCの直流抵抗分Rvは0.2Ω、インダクタンスLvは15μH以下である。LLSは複数のCMPから構成されるリニアレベルセンサである。LLSは、入力電圧Viの大きさに応じて対応するトランジスタのベースに定電圧パルスを出力する。それぞれのTrは、Cを定電流放電させる。結果として、Viの大きさに応じてデジタル電流がVFCに出力される。VFCの電流Ivfを次に示す。入力電圧Viに対するCMPの出力個数をnx、CMPの基準電圧をVrefとすれば、

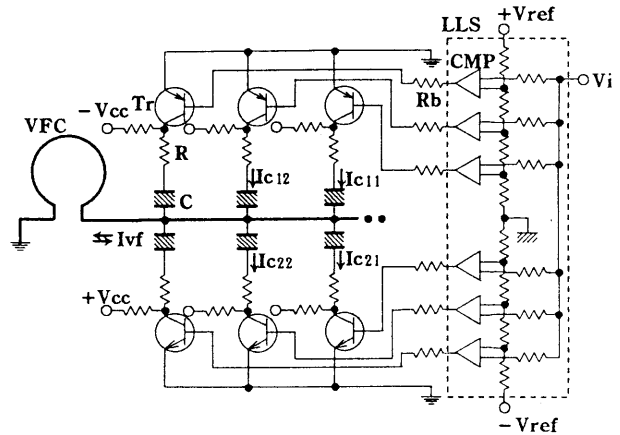


図1 ドライブ回路

(1)

$$n_x = \left\langle \frac{V_i}{V_{ref}} \right\rangle$$

となる。ただし、 $\langle \rangle$ は整数のみをとることとする。ここで、すべてのTrのhFEおよびベース抵抗Rb、保護抵抗Rの値を等しいとすれば

$$\begin{aligned} |I_c| &= I_{c11} = I_{c12} = \dots = I_{cn} \\ &= -I_{c21} = -I_{c22} = \dots = -I_{cn} \end{aligned} \quad (2)$$

となるからIvfは次のように表される。

$$I_{vf} = n_x |I_c| = n_x n_{FE} \frac{|V_{cmp}|}{R_b} \quad (3)$$

ここで、Vcmpは正負のコンパレータの出力電圧である。したがって、Ivfは定電流Icの整数倍となる。すなわち、このドライブは入力電圧Viに対して分解能nxのデジタルIvfを出力する。さらに、このIvfの通電時間の最大Tmaxは、Cの大きさと充電電圧Vc、コレクタ電流Icから次のように表される。

$$T_{max} = \frac{C \{V_c - (V_s + V_i)\}}{I_c} \quad (4)$$

ここで、 V_s は Tr の飽和電圧、 V_z は $Z1 \cdot I_m$ で表される負荷電圧である。実際の V_s 、 V_z は数Vであるので、これらは V_c に比較して一桁から二桁小さい。すなわち、 T_{max} は段数に無関係に(4)式で与えられ、 I_c が一定ならば C または V_c の大きさで決定される。

4. ドライブの動作特性

4.1 入出力特性

ドライブに繰り返し周波数1kHz、振幅電圧 $\pm 8V$ の三角波 V_i を入力した場合の I_{vf} のトレースを図2示す。このときドライブの C は15Vに充電している。 I_{vf} 波形はシャント抵抗 0.1Ω を挿入して計測している。 I_{vf} は量子化誤差のため階段状の波形となるが、全体として V_i と相似の波形をしている。 $-I_{vf}$ と $+I_{vf}$ の階段の高さが違うため、 $-I_{vf}$ は $+I_{vf}$ に較べ小さい振幅となる。

4.2 パルス応答特性

波長 $0.2ms$ 、振幅電圧 $\pm 8.2V$ の矩形 V_i を入力した場合の I_{vf} 波形を図3に示す。この図からVFCを含むドライブの時定数は $18\mu s$ となる。

4.3 周波数特性

図4は繰り返し周波数 f を100Hzから100kHzまで変化させた場合の I_{vf} のプロットである。100Hzから1kHzでは徐々に I_{vf} 振幅は上昇し、1kHzから10kHzで最大振幅43.3Aとなる。10kHz以上で I_{vf} は急激に減少し、100kHzでは $+I_v$ 、 $-I_v$ 共10A以下となる。これは、低周波領域においては、 C と Tr の出力インピーダンスによる応答周波数が、高周波領域においては、CMPのスルーレートと Tr の応答速度が影響しているからである。

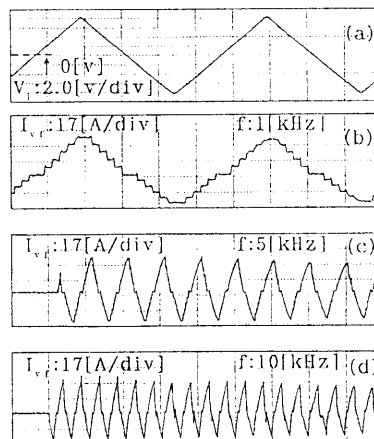


図2 V_i と I_{vf} 波形

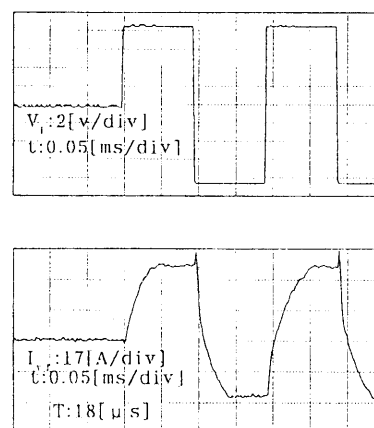


図3 ドライブのパルス応答

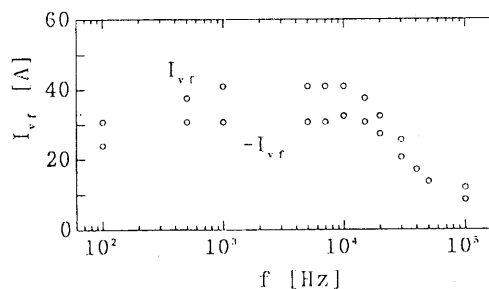


図4 ドライブの周波数特性

5. ドライブ出力とプラズマ電流持続時間

このドライブをHAMANA-Tに取り付け、プラズマ電流 I_p 、ドライブ出力時のプラズマ電流 I_{pf} とその時のドライブ電流 I_{vf} の実験結果は、つぎの通りとなる。 I_p の最大電流は2.78kA、 T_p は1.64mSとなる。この時 I_p は激しく変化する。プラズマ水平変位($R=20\text{cm}$ からの変位)は I_p に同期して激しくトーラス容器主半径方向に変位する。 I_{pf} の最大電流は2.94kA、 T_p は2.26mSである。 I_{pf} は I_p に比較して激しく変化せず、最大値から徐々に減少する。このときのプラズマ水平変位はほぼ0に留まっている。一方、 I_{vf} は正負にデジタル的に変化しながら出力される。すなわち、ドライブが B_{vf} を印加する場合、 T_p は1.37倍長くなり、 I_{pf} の変動は小さくなる。このとき、 ΔH は小さい。このドライブが、HAMANA-Tのプラズマ水平位置制御を可能にした。

6. まとめ

◎ ドライブが制御垂直磁場を印加する場合

1. プラズマ水平位置変位は小さくなる
2. プラズマ電流持続時間は1.37倍長くなる

◎ ドライブの特徴

1. n ユニットが接続されれば、1ユニットの n 倍の電流が出力される
2. 最大ユニット数は、その出力インピーダンスとプラズマを含むVFCコイルのインピーダンスから決定される
3. ユニット数を多くすれば量子化誤差は減少する
4. 全てのトランジスタのエミッタがグランド電位となるので、パルストランスを介さずにCMP回路が直接接続出来る
5. ベース電流の均等化は、問題とならない
6. 10kHzを越える周波数では出力電流は減少する