直流アクティブフィルタ **DC** Active Filters

近年、高エネルギー物理実験、超電導材料試験、粒子加速などの研究設備に使用 される電磁石励磁用直流電源の需要が増大している。この直流電源には高安定度, 低リップルが要求される。今回, 直流電源のリップルを低減させる低コストでコン パクトな直流アクティブフィルタを製作し、直流電源と組合せ試験を行ない、目標 どおりのリップル減衰特性が得られた。本稿は、この直流アクティブフィルタの構 成,原理及び特長を述べるとともに、試験結果について報告する。

新冨孝和*	Takakazu Shintomi
柏崎 博**	Hiroshi Kashiwazaki
塩入盛雄***	Morio Shioiri
竹内昌明**	Masaaki Takeuchi

1 緒 言

近年,核融合あるいは高エネルギー物理実験,物性研究, 超電導材料試験, 医学研究と種々の電磁石を使用した研究設 備の建設が計画されている。

これに伴い電磁石励磁用の直流電源装置の需要が大きく伸 びてきているが, この直流電源装置には磁場の安定化のため に,出力電流の高安定度と低リップルが要求されている。

今回, 高エネルギー物理学研究所の指導のもとに, 直流電

源の出力に含まれるリップル電圧を抑制するリアクトルトラ ンスを用いた直流アクティブフィルタの製作・開発を行なっ た。

以下に、 種々の 直流 フィルタの 特徴を述べるとともに、 製 作した直流アクティブフィルタの試験結果について報告する。

リップル電圧発生量と各種直流フィルタ 2

2.1 直流電源から発生するリップル電圧と電流

表 レ サイリスタ直流電源から発生するリップル電圧 サイリス タ直流電源の出力電圧には,理論高調波成分のほかに種々の要因による非理論 高調波成分が含まれる。

n	V_n (%)	V _n /n (%)	n	V _n (%)	V_n/n (%)
1	1.2	1.20	21	1.2	0.06
2	3.4	1.70	22	3.0	0.14
3	1.2	0.40	23	1.2	0.05
4	2.4	0.60	24	16.2	0.68
5	1.2	0.24	25	1.0	0.04
6	1.2	0.20	26	3.6	0.14
7	1.2	0.17	27	1.0	0.04
8	2.0	0.25	28	١.6	0.06
9	1.2	0.13	29	1.0	0.03
10	3.6	0.36	30	1.0	0.03
11	1.2	0.11	31	1.0	0.03
12	32.8	2.73	32	2.0	0.06
13	1.2	0.09	33	1.0	0.03
14	3.6	0.26	34	2.6	0.08
15	1.2	0.08	35	1.0	0.03
16	١.8	0.11	36	10.4	0.29
17	1.2	0.07	37	1.0	0.03
18	1.2	0.07	38	3.6	0.09
19	1.2	0.06	39	1.0	0.03
20	2.0	0.10	40	1.0	0.03

注:略語説明

n(次数), V_n[リップル電圧振幅(無負荷直流電圧に対する割合)]

一般的に,容量の大きな直流電源装置は,サイリスタ素子 を用いた多相整流回路から構成されるため、直流出力電圧に はその整流相数の整数倍次数の理論高調波リップル電圧, 交 流入力電圧の相間不平衡に起因する偶数次調波リップル電圧, 及びサイリスタ素子のゲート点弧パルスの各相ばらつきによ る各整数次のリップル電圧を含む。

表1に、12相整流直流電源装置の出力電圧に含まれる高調 波成分を示す。

直流電源の出力電流に含まれるリップル電流は、 リップル 電圧と負荷電磁石のインピーダンスから次の(1)式で求めら れる。

 $I_n = V_n / (2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot L + R)$ 一般に、 $2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot L \gg R$ であるので $I_n = V_n / 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot L$ $= V_n / 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot n \cdot L \cdots (1)$ ここに n: 整数 In: 第n 次調波リップル電流 V_n : 第n 次調波リップル電圧 f_n : 周波数(f_1 は交流電源周波数) L:負荷電磁石のインダクタンス R: 負荷電磁石の抵抗

これより、リップル電流はリップル電圧の次数分の一に比 例することが分かる。表1にはVn/nの値も記載した。

2.2 直流フィルタの目標性能

表1から、直流電源の出力電流に含まれるリップル電流は 第1次~第4次程度までの比較的低周波数成分と整流相数の 倍数次成分が多い。これより直流フィルタの性能として,

29

第1次~第6次まで:20dB

条件 (1) 入力交流電圧不平衡 3%

(2) サイリスタ素子ゲートパルスの相間ばらつき土 | 度 (3) サイリスタ素子ゲート点弧角70度 (4) 整流相数 12相

第7次~第24次まで:30dB 第25次~第40次まで:20dB 減衰させることを目標とした。

* 高エネルギー物理学研究所理学博士 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所機電事業本部

398 日立評論 VOL. 63 No. 6(1981-6)

2.3 従来の直流フィルタ

直流フィルタとしては, 直列リアクトルと並列コンデンサ を用いたパッシブフィルタ, 直列トランジスタを用いたアク ティブフィルタが従来からよく用いられてきた。

(1) 直列リアクトルと並列コンデンサを用いたパッシブフィ ルタ

図1に本方式のフィルタの回路構成とリップル電圧減衰特 性を示す。このフィルタで第1次成分を20dB減衰させるとす れば、図1から

 $\omega_o = \omega_1/5.4$

したがって、 $L \cdot C = 2.95 \times 10^{-4} (f_1 = 50 \text{Hz})$

となり、例えばL = 1 mHとすれば、C = 0.3 Fと非常に大きな値となる。

また, 直流電源装置の電流立上げが速い場合には, フィル タのω。を小さくできないため, この方式は使用できない。 (2) 直列トランジスタを用いたアクティブフィルタ

図2(a)に本方式の構成を、同図(b)に動作波形を示す。

この方式では、(リップル電圧)×(直流出力電流)がすべて 直列トランジスタの熱損失となるため、トランジスタの容量 を小さくする目的で、直流電源の出力に小容量の直列リアク トルと並列コンデンサを用いている。

本方式はトランジスタを用いているため, 電圧リップルの 減衰特性は良いが発生損失が大きく, 価格も高くなるととも にサイリスタ電源の制御系との間の干渉など, 制御上の困難



図2 直列トランジスタフィルタ 図中の斜線部がすべて熱となるた

さも大きい。このことは、超電導コイルのように数ないし数 +キロアンペアの大電流を流す場合には特に問題となる。

B リアクトルトランス式アクティブフィルタ

3.1 回路構成と動作原理

30

図3にリアクトルトランスを用いたアクティブフィルタの 回路構成を示す。直流電源の出力電圧を検出し、この電圧か



め、効率は悪い。



図3 アクティブフィルタ回路構成 リアクトルトランス方式のアク ティブフィルタは,非常に簡単な回路構成で,使用部品も少ない。

らハイパスフィルタで直流成分を除去するとともに電圧の大きさを調整する。ハイパスフィルタの出力信号を出力アンプで増幅し、リアクトルトランスを介して直流電源出力電圧に逆位相で重畳することにより、直流出力電圧に含まれるリップル電圧を減衰させる。この方式のリップル電圧減衰量は、 図4に示すように次の(2)式で計算できる。

> $g_n = \{V_n \sin \theta + V_o \sin(\theta + \pi + \varphi)\} / V_n$ = $\sin \theta - k \sin(\theta + \varphi)$

 $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ $\frac{R}{2}\sqrt{C/L}=0.25(R:C回路の抵抗分)$

図 | $L-C 7 ィ \mu 9 の 減衰特性 実際のL-C 7 ィ \mu 9 では、C 回路に抵抗分があるため、40dB/decの減衰性能は得られない。$

 $= \sqrt{(1+k^2-2 k \cos \varphi)} \cdot \sin(\theta - \phi)$ これよりgnの最大値は ここで g_n : 第n 次調波リップル電圧の減衰量 Vn: 直流電源の出力電圧に含まれる第 n 次調波リ



の波及がない。

など,従来の方式に比べ大きな利点がある。

4 製作試験結果

4.1 製作品の仕様

製作品の仕様を表2に、また盤内部を図5に示す。

4.2 試験結果

製作したアクティブフィルタを,12相サイリスタ直流電源 に図3に示したように接続し試験した。図6(a)にアクティブ フィルタの入・出力電圧波形を,同図(b)に出力アンプの電流 波形を示す。出力電圧にまだかなりのスパイク状の電圧が含 まれるが,これは非常に高周波であるため小容量の直列リア クトルと並列コンデンサを入力側に入れることにより,容易 に除去できる。

図7に各周波数に対するリップル電圧減衰特性を示す。図 中, ♀印は測定器の性能上, 測定できなかった部分であるが, ♀印で示した値よりは小さくなっている。この測定結果によ れば, 前出の目標性能を十分満足している。

製作品と同等仕様の直列トランジスタ方式のアクティブフ

表2 製作品の仕様 電磁石の超電導化により, 直流電源の出力が低圧・ 大電流となってきていることから, 製作品の電圧, 電流を25V, 2,500Aとした。

図4 アクティブフィルタ動作と特性 リップル電圧減衰特性は、リップル電圧、リアクトルトランス出力電圧の位相誤差及びゲイン誤差により決定される。

項目	仕	様
直流入・出力電圧	25	V
直流入・出力電流	2,50	AOC
入力リップル電圧	15V	
リップル電圧減衰率 —	(1)ピーク値	30dB
	(2) 1 ~ 6 次	20dB
	(3) 7~24次	30dB
	(4) 25~40次	20dB
	幅	850mm
寸 法	奥行	I,000mm
	高さ	I,100mm

ップル電圧

Vo:リアクトルトランス出力電圧

 $\varphi: V_n \geq V_o$ 間の位相誤差

 $k : V_n/V_o$

 $\phi: \tan^{-1} \{k\sin\theta/(1-k\cos\varphi)\}$

したがって、本方式ではハイパスフィルタ、出力アンプ、リ アクトルトランスの総合周波数特性で位相誤差は2~3度、ゲ イン誤差で3%程度の範囲にあれば目標減衰量を満足できる。

3.2 本方式の特長

本方式の特長を下記に述べる。

(1) 回路構成部品が少なく信頼性が高い。

(2) 出力アンプの容量は(リップル電圧)×(リップル電流)で よく,直列トランジスタ方式に比べて非常に小さくなるため 発生損失も小さい。

(3) 制御回路もハイパスフィルタだけでよく簡単である。

(4) 既設の直列電源への追加組込みが容易である。



(5)入出力電圧・電流の変更が簡単にできる(リアクトルトランスのAC側巻線のタップ切換、リアクトルトランスの直列・並列接続化などにより容易である。また、装置自体の直列・並列接続も可能である)。
(6)フィルタのアンプがリアクトルトランスにより主回路と切り離されているので、電源あるいは負荷の原因による事故

図 5 アクティブフィルタ 上部に出力アンプを,下部にリアクトルト ランスを設置した構成である。

31



注:上(出力電圧 5V/div.),下(入力電圧 10V/div.) 橫軸 2 ms/div.







図7 アクティブフィルタの減衰特性実測値 ○印の部分は、入力リ ップル電圧が小さいため、出力側では測定器の感度以下となり読取りができな かったものである。

ィルタの概略検討を行なった。

注:IA/div., 2ms/div.

32

(b) 出力アンプ電流波形

図6 アクティブフィルタの入・出力電圧波形及び出力アンプ電 流波形 出力電圧に含まれるスパイク状電圧は、入力側に小容量のL-Cフィ ルタを入れることにより、容易に除去できる。また、出力アンプ電流は、直流 出力電流に含まれるリップルと相似な波形になる。

表3 各種フィルタの比較 損失,コスト,寸法いずれの面でも,リアクトルトランス方式のアクティブフィルタは優れている。

フィルタ方式 項 目	直列リアクトル+ 並列コンデンサ	直列トランジスタ を用いたアクティ ブフィルタ	リアクトルトラン スを用いたアクテ ィブフィルタ
フィルタ特性	×	0	0
損 失		×	0
コスト	0	×	0
寸 法	\bigtriangleup	×	0
制御上の難易度	-	×	0

 V_r : リップル電圧(15× = 3 V)

 P_{TRS} :トランジスタ容量(W)

Id: 直流入・出力電流(2,500A)

この発生損失は製作品のリアクトルトランス方式のアクティブフィルタの約5~6倍となる。また、200Wクラスのトランジスタを用いて、この直列トランジスタ方式のアクティブフィルタを構成すれば、トランジスタ1個当たり80W負担させるとしても並列数は約140となり、回路の構成はかなり複雑となる。更に、トランジスタの負担を軽減するために前置L-Cフィルタ、特にLの容量を相当大きくしなければならない。

5 結 言

製作したリアクトルトランス方式のアクティブフィルタと 同一仕様の直列トランジスタ方式のアクティブフィルタとを 比較すると,表3各種フィルタの比較に示すようにリアクト ルトランス方式のアクティブフィルタは、コスト、寸法、発生 損失といずれの面でも優れており、低コストでコンパクトな ものとなっている。

また、リアクトルトランス方式のアクティブフィルタは、 直流フィルタとしてばかりではなく、交流フィルタとして、

交流電圧に含まれる高調波電圧の抑制などにもそのまま応用 でき,その適用範囲は広い。 今後,更に研究を重ね性能の向上をいっそう図っていく考 えである。 最後に,本アクティブフィルタの開発及び試験に御指導, 御協力をいただいた関係各位に対し,深謝する次第である。