富士時報 Vol.58 No.5 1985 UDC 621.311.6:537.312.62:621.318.3

TOPAZ 薄肉超電導電磁石用電源装置

*1 山本 明(やまもと あきら) *2 山田 修(やまだ おさむ) *3 石田 紘一(いしだ こういち) *4 渡辺 正俊(わたなべ まさとし)
*5 中島 勝紀(なかじま かつのり)

1 まえがき

前稿「TOPAZ 薄肉超電導電磁石」で紹介されているように，この超電導電磁石には粒子検出器として，①均一な磁界を発生させること，②磁界脈動が小さく，かつ安定性の高いこと，が要求される。均一な磁界を発生させるという要求は，電磁石側で達成される要求であるが，脈動が小さく，かつ安定性の高い磁界発生の要求は，電磁石に電力を供給する電源装置側で解決されなければならない問題である。

今回，TOPAZ 薄肉超電導電磁石用として，出力 DC 5,000 A，15 V，電流リプル 2×10^{-4} p-p，電流安定度 2×10^{-4}/h という低リプル，高安定度の直流電源装置を製作・納入したので，装置の概要及び実負荷試験結果について紹介する。

2 装置概要

2.1 装置計画

この装置は，TOPAZ 薄肉超電導電磁石の直流安定化電源として，次の条件のもとに計画された。

(1) 定電圧・定電流（CV-CC）制御の機能を有し，電流，電圧とも連続可変とすること。

(2) 電流は指令に基づき一定の変化率で増減させ，目標値に到達後，目標値で一定制御すること。

(3) 出力電流及び電流増減時の変化率は，0～5,000 A，及び0.1～4.0 A/s 間で任意に設定できること。

(4) この装置又は電磁石に異常が生じた場合(重故障)には，速やかに超電導コイルのエネルギーを回収（放電）させる回路を設けること。また，軽故障発生時には，所定の変化率（0.1～4 A/s 可変）で電流を減少（スローダウン）させ，コイルエネルギーを電源側へ回生するものとすること。

(5) 通電中の電磁石回路は，いかなる場合でも開とならないようにすること。

(6) 超電導コイルのクエンチ（常電導へ転移して抵抗分が発生する現象）を検出する機能を有すること。

(7) 装置の小形化と電源室内への熱放散防止のため，主回路機器は水冷とすること。

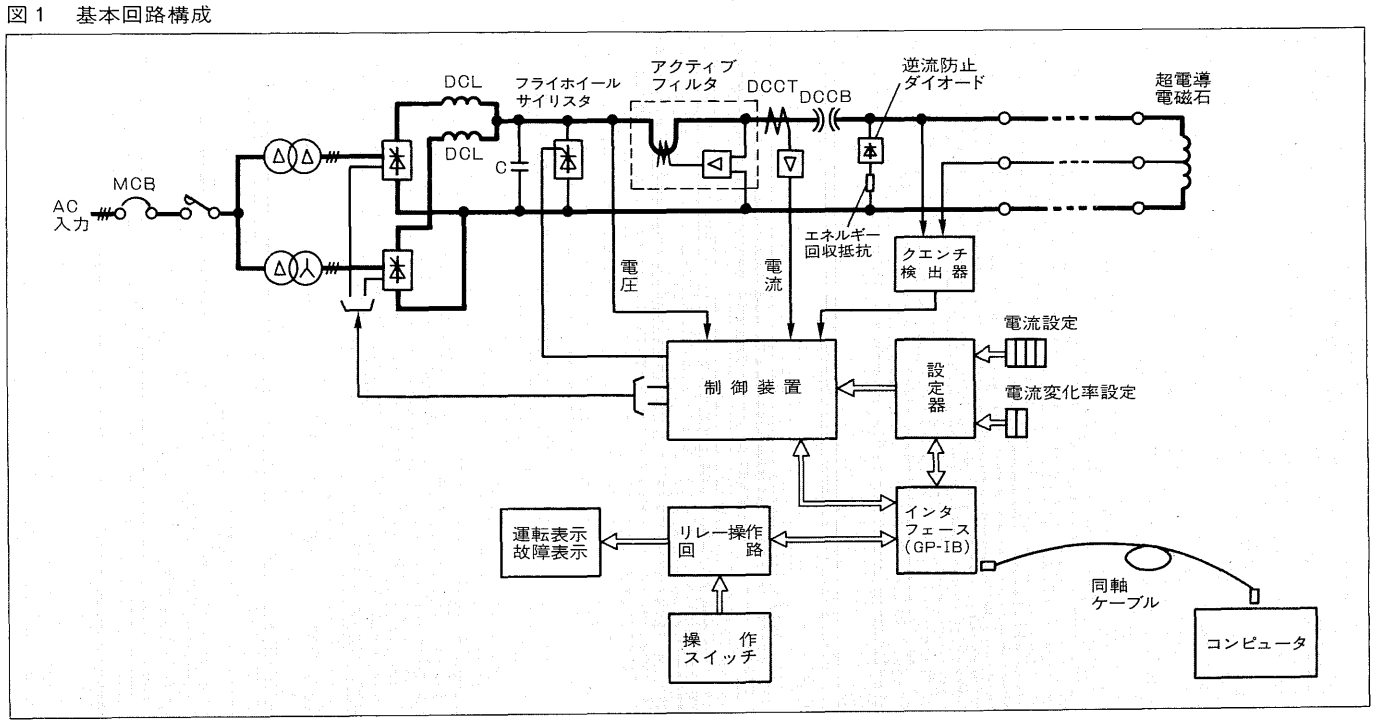
(8) コンピュータによる遠隔操作・監視が行えるものとすること。

2.2 装置構成

この装置は，受電・整流系，エネルギー回収系，制御系，で構成され，その基本回路構成を図1に示す。

受電・整流系には，サイリスタによる12相整流を採用し，

図1 基本回路構成



*1 文部省 高エネルギー物理学研究所 *2 電機事業本部 綜合技術第二部 *3 東京工場 設計第二部 *4 東京工場 品質保証部
*5 富士電機エンジニアリング(株)試験部

電源系統側への高調波フィードバックが小さく，かつ直流側でのリプルの小さいものとし，LC フィルタとアクティブフィルタを併用して，電流リプルの低減を図った。

エネルギー回収系は，クエンチ検出器，エネルギー回収抵抗，逆流防止ダイオード，直流高速度遮断器で構成され装置本体又は電磁石異常時の超電導コイルエネルギー吸収回路を形成している。

制御系は，CV-CC 制御のために，電圧・電流を検出して制御装置にフィードバックし，電圧制御ループと電流制御ループの併用により，CV-CC 制御を行う制御方式としている。

本装置を文部省高エネルギー物理学研究所に設置するコンピュータで遠隔操作・監視が行えるよう，GP-IB によるインタフェースを設けている。

3 仕様・性能

この装置の仕様・性能を表1に示す。

表1　仕様・性能

負荷	インダクタンス	約3H
	回路抵抗	約0.6mΩ
出力	電流	DC 0 ～ 5,000 A
	電圧	DC 0 ～ 15 V
	電流リプル	2×10^{-4} p-p 以下
	電圧リプル	5×10^{-3} p-p 以下
	電流安定度	2×10^{-4}/8h 以下
	電圧安定度	1×10^{-3}/8h 以下
	電流変化率	最大4A/s
入力	電圧	210/420V±10%
	相数	三相
	周波数	50±0.2Hz
冷却方式		水冷及び風冷の併用
付属機能		① クエンチ検出回路 ② エネルギー回収回路 ③ GP-IB によるコンピュータインタフェース

4 回路構成と動作

4.1 主回路

三相交流入力は，入力変圧器（△－△，△－人）で絶縁後，二組の三相純ブリッジ接続サイリスタ変換器で12相整流され直流に変換される。変換器出力電圧のリプルは，直流リアクトル（DCL）とコンデンサからなる LC パッシブフィルタとアクティブフィルタで平滑化されている。サイリスタ変換器は，コンバータ運転だけでなく，超電導コイル電流の減少時にはインバータ運転を行い，コイルエネルギーを交流電源側へ回生する。

アクティブフィルタは，出力電圧の直流分をハイパスフィルタで除き，リプル成分だけを増幅・位相反転後，絶縁して一次導体に注入する方式のものである。

フィルタで平滑された直流電流は，制御用の絶縁形直流変流器（DCCT），直流遮断器（DCCB）を通して負荷の電磁石に供給される。この DCCB には，直流電鉄変電設備で使用される直流高速度遮断器を使用した。

クエンチ発生などの重故障発生時には，この DCCB を開放して，エネルギー回収抵抗にコイルエネルギーを消費させるものとし，同時にサイリスタ変換器に並列接続したフライホイールサイリスタを点弧させて，DCCB 遮断時に発生するノイズから変換器を保護している。

4.2 制御回路

制御系は，図2に示すように，DVR マイナループ付の ACR（直流電圧制御マイナループ付電流制御）で構成される。電流設定器から与えられる設定値 i^* と DCCT で検出される電流実際値 i の偏差を電流調節器で増幅して電圧指令値 v^* とし，この指令値 v^* と電圧実際値の偏差に基づいて電圧調節器が出すサイリスタの点弧角 α^* でサイリスタを点弧させ，定電流制御を行っている。

CV-CC の制御機能は，電流調節器出力を電圧設定器で設定した電圧に制限する電圧リミット制御で，定電圧の機能を実現し，電圧指令値がこの制限値以内なら，定電流制御となる。

電流の運転パターンは，図3に示すように，あらかじめ設定した電流到達値と変化率に基づいて作られる設定値 i^* により，電流を増加し目標値に到達させ，停止条件では所

図2　制御系

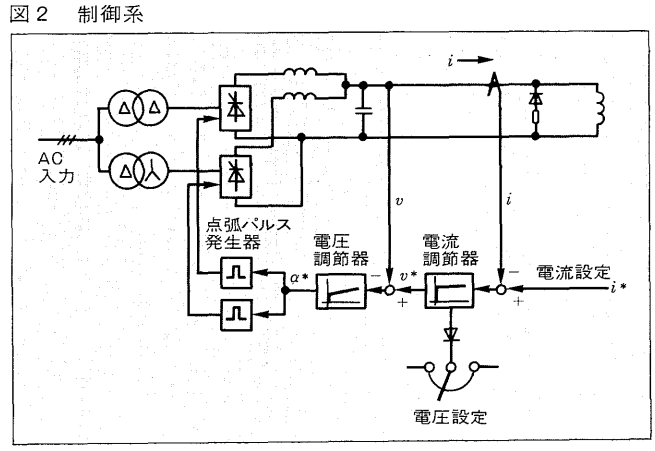


図3　電流の運転パターン

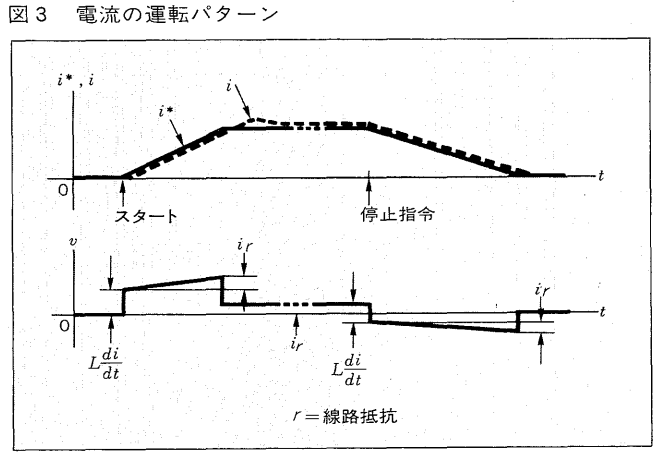
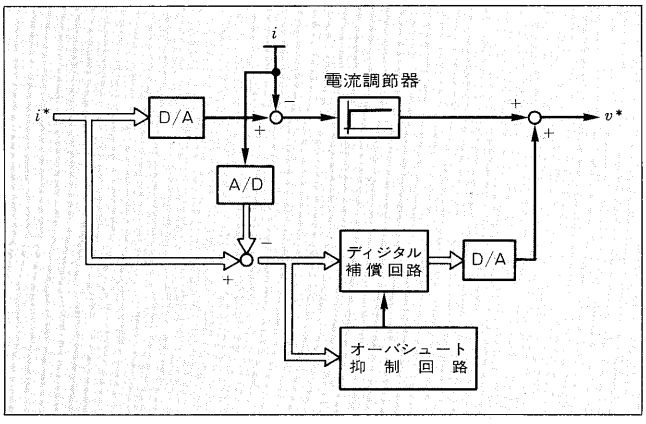


図4　ディジタル補償とオーバシュート抑制回路



定の変化率で減少させるほか，任意の時点での電流増減の中止，認定変更を行えるようにしている。

電流制御回路は，アナログ制御を採用しているが，電流検出器として高精度・高安定の絶縁形DCCTを採用し，その出力をフィードバックするとともに，高分解能のA/D変換器でディジタル化し，設定値（ディジタル）と比較することにより，アナログ回路のドリフトを補償して制御精度を高めている。これを図4に示す。

一方，電磁石としては，設定変更時の電流のオーバシュート及びアンダシュートを極力抑える必要があり，このため，ディジタル演算によるオーバシュート抑制回路をディジタル補償回路に付加している。

4.3　保護・監視

直流過電圧・過電流，入力変圧器の温度異常，冷却水の温度・流量異常など装置本体の故障のほか，電磁石・冷凍機異常など負荷側の故障時には，故障内容を装置盤面に表示するとともに，インタロック回路により装置本体及び電磁石を保護している。

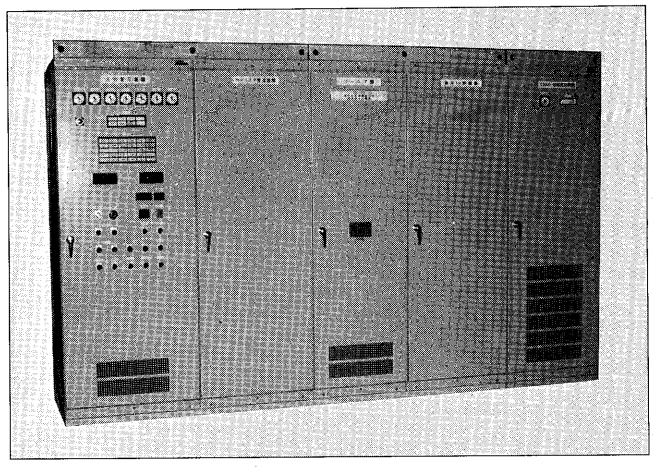
軽故障の場合は，故障発生により電流をスローダウンさせて電流を零とし，重故障の場合は，DCCBを速やかに遮断又は装置を運転不能とするインタロックをかけている。

上記故障のほか，装置のオン・オフなどの動作状態，出力電圧，出力電流の実際値を本体盤面に表示する一方，GP-IBインタフェースを介して，同軸ケーブルで信号伝送し，コンピュータのCRT画面で監視できるようにしている。

5　外　観

この装置は，「入力変圧器盤」，「サイリスタ整流器盤」，「フィルタ盤」，「直流遮断器盤」，「エネルギー回収抵抗器盤」の各1面，計5面から構成されている。図5にその外観を示す。

図5　外観



6　試験結果

抵抗負荷，模擬負荷で，電圧DC 0～15V，電流0～5,000 Aとして，電流・電圧の安定性，リプル特性などの特性試験，

図6　運転特性

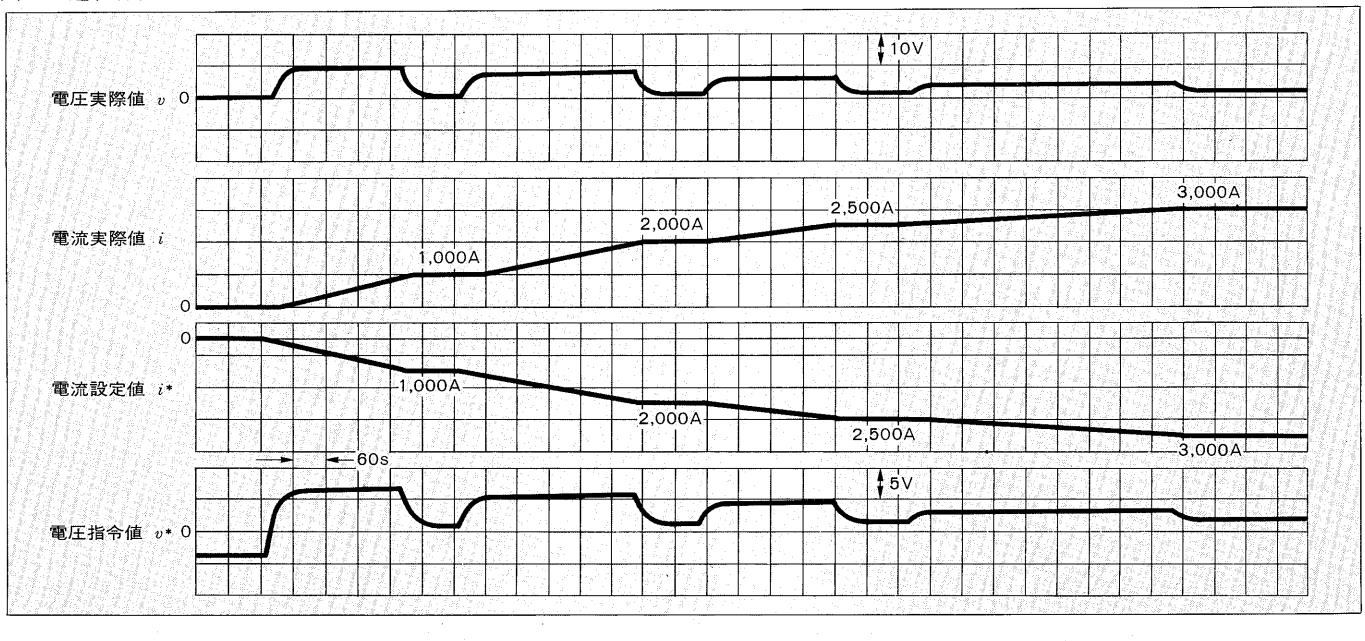
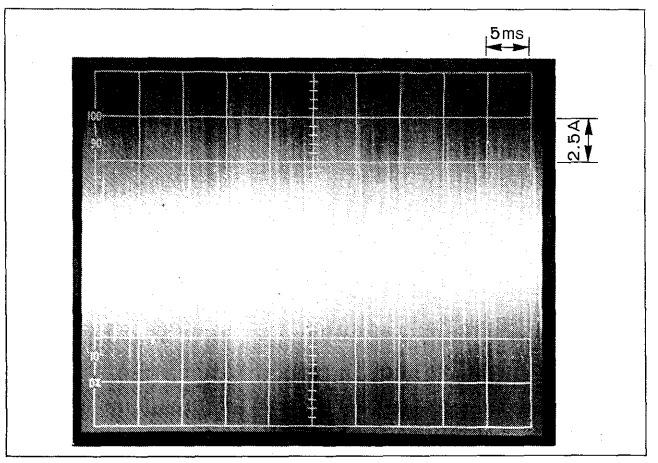


図7　電流リプル（$i=3,000$ A）
〈注〉 DCCT からのホワイトノイズのため白くぼけているが，実際のリプルはほとんどない。



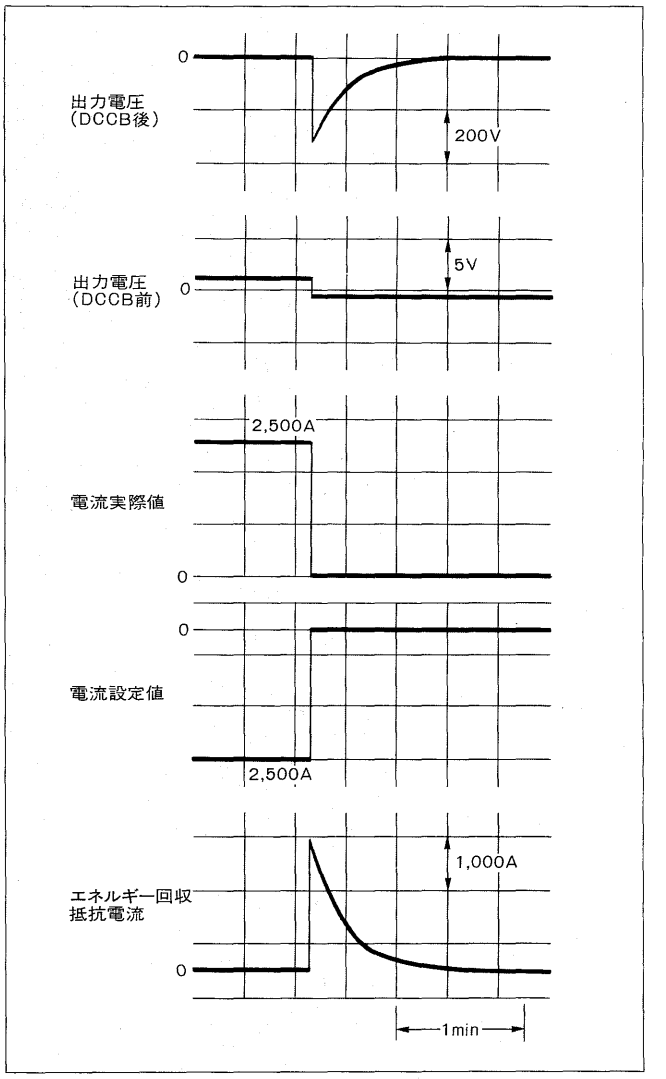
各種インタロック試験後，実負荷試験を行った。運転特性データを図6に，電流リプルのオシログラムを図7に示す。

超電導コイルのインダクタンス L は極めて大きく，往復線路抵抗を r としたとき，回路の時定数 $T=L/r$ は数千秒と極めて長くなるが，同図に示されるように，設定に対して良好な追従特性を示し，極めて小さなオーバシュートで設定値に到達しており，設定値到達後の定電流制御も極めて安定であった。

更に，超電導コイルを局部的に加熱してクエンチを発生させるヒータクエンチテストでは，直流高速度遮断器が確実に動作して，コイルエネルギーが抵抗器に回収されることを確認した。図8にクエンチ試験結果を示す。

また，コンピュータによる遠隔操作・監視も，安全かつ確実に行われることが確かめられた。

図8　クエンチ試験データ



7　あとがき

本稿では，このたび製作したTOPAZ 薄肉超電導電磁石用電源装置の概要と実負荷試験結果を紹介した。装置は，大電流の高精度・高安定制御を実現し，コンピュータによる遠隔操作・監視も良好で，操作性の優れたものとなった。

今後，ますます増加するであろう電源装置の高性能化のニーズに対して，今回の経験を生かすとともに新たな展開を図る所存である。

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。