

氏名 熊 田 雅 之

学位（専攻分野） 博士（工学）

学 位 記 番 号 総研大乙第14号

学位授与の日付 平成8年3月21日

学位授与の要件 数物科学研究科

学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 ANALYSIS OF RIPPLE CURRENT AND ITS PERFORMANCE
IN HIMAC SYNCHROTRON POWER SUPPLY

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 遠 藤 有 聲

教 授 新 富 孝 和

教 授 山 根 功

教 授 春 田 俊 夫

助教授 入 江 吉 郎

教 授 矢 野 昌 雄（東洋大学）

論文内容の要旨

シンクロトロンにおける低電流リップル電源の実現のため、次の諸点に着目した。

- 1) 電源と電磁石列にノーマルモードとコモンモードの電流リップルの概念を導入することにより、電源と電磁石列回路の対称化（6端子回路）をはかり、両方のモードフィルターの導入する。
- 2) ノーマルモード電流およびスパイク電流の解析解を求め、モード解析を行う。
- 3) 電源の性能を制限している要因の究明し、その対策を講ずる。
- 4) 電源と電磁石列の間の共振に対する対策を講ずる。

従来の電源構成では（1）ノーマルモード・フィルター+アクティブ・フィルターによる構成でコモンモード・フィルターは使用していない。（2）電磁石列及び電源回路は非対称である。（3）非対称からくるモードミキシングによりノーマルモード \leftrightarrow コモンモードの相互移行がおり、ノーマルモード・フィルターだけではリップル除去はできない。（4）整流器（SCR）の midpoint が浮遊容量を持ちコモンモード電流の帰路が確保できないため電源回路外にノイズが放出される。などの諸問題があり、特に遅いビーム取り出しにおいて要求される高電流安定度の実現は困難であった。この論文は、これらの問題を詳細に解析することによって解決策を与えるものである。

低リップル（1ppm以下）電源の実現には、

- 1) ノーマルモード・フィルターに加えて、SCR midpoint 接地とコモンモード・フィルターの導入により、基本論理リップル周波数以上のコモンモード・リップルを低減させる。これで、ノーマルとコモンモード・リップルはこれらの静的低域通過フィルターで大部分は除去できる。さらに、高周波のリップル、スパイク電流は架橋抵抗による共振のダンピング効果を利用する。
- 2) 共振特性の除去のため、コイル両端に架橋抵抗を接続して、ノーマル、コモンモード電流が除去でき、かつスパイク電流の振動を指数関数的に減衰させることが定量的に解明された。
- 3) 上下コイルの分離結線により、コモンモード・リップルを減少させた。
- 4) フィルターのカットオフ周波数（71Hz）のため除去できない50, 100Hzの非論理リップルはこれらの対策では除去できないので、別の対策（アクティブフィルターと25Hzのカットオフ周波数を持つ低域通過フィルターの併用、および低ノイズDCCTの利用）を行った。

モード分離によるリップルおよびスパイク電流の定式化のため、

電磁石列は通常伝送回路として扱われるが、これをLCRの梯子型回路（過去には不完全ながらRegenstreifやVan der Meerによる検討がある）と見做し、リップル電流の通路となるコイルと鉄心の中に存在する浮遊容量に注目した。電磁石の上下コイルを電流の行きと帰りとに分離結線することにより、電磁石列が鉄心と同電位にある接地線に関して対称になることとに着目し、（+、アース、-）ラインを入力3端子、出力3端子の6端子回路網として扱った。電源および電磁石列が接地線に関して完全対称であれば、コ

モンとノーマルの2つのモードに分離でき、それぞれを4端子網として独立に扱うことができることを示した。モード分離により、電圧・電流・アドミッタンスが解析的に表現でき、周波数領域および時間領域におけるリップルおよびスパイク電流の解析解を求めた。また梯子型回路のコモンとノーマルモードの共振特性を解析的に記述した。これを実験的に検証するために電磁石列のアドミッタンスの周波数特性測定を行い、解析解との良い一致が得られた。

[1] リップル電流解析では、

- 1) コモンとノーマルモードそれぞれの電源出力端から見たインピーダンス（アドミッタンス）が定義できる。
- 2) 電磁石列の各セルのコモンとノーマルモード電流および電圧の定式化し、電流および電圧に共振特性が現れることを示した。また、誘導した式からリップル電流の空間分布および周波数特性が得られることが示されている。
- 3) コイル端子の架橋抵抗により共振特性が改善できることが定量的に理解でき、架橋抵抗により両方のモードの共振が押さえられ、リップル電流も減少することが示されている。

[2] スパイク電流解析では、

電源出力端アドミッタンスを部分分数展開することにより、

- 1) コモンとノーマルモードの共振周波数と減衰定数の定式化がなされている。
- 2) コモンとノーマルモードに対して全ての共振条件を消すための架橋抵抗値が得られた。
- 3) 電圧のステップ変化によるコモンとノーマルモード・スパイク電流の定式化が行なわれた。
- 4) 架橋抵抗によるスパイク電流の減衰が定量化に把握された。

[3] 電源+電磁石列における解析

電磁石列におけると同じ対称性を電源に適用し、SCRの中性点接地によりコモンとノーマルモードは電磁石列のアドミッタンスの違いを除いて同じ形の伝達関数を持つことを式で示している。

結論として、

シンクロトロン電磁石列を梯子型回路でモデル化し、コモンモードとノーマルモード電流の定式化を行った。接地線を含む電源・電磁石列を6端子回路網として扱い、対称配置の場合には簡単にモード分離ができ、各モードに対して4端子回路網として扱えること着目し、これにより電圧・電流・アドミッタンスが解析的に表現できることを示し、周波数領域および時間領域におけるリップルおよびスパイク電流の解析解を求めた。この解析を通してコイル架橋抵抗の役割が解析的に表現できた。さらに、コモンモードとノーマルモード・フィルターの性能評価、コイルの分離結線によるコモンモード・インピーダンスの評価を行い、定式化に基づく解析から低リップル電源の性能評価を可能にした。

論文の審査結果の要旨

熊田雅之君の論文は、放射線医学総合研究所の医療用重粒子シンクロトロンにおけるサイリスター整流電源装置のリプル電流低減に関する研究である。リプル発生は、サイリスターの転流に伴う論理リプル及びスパイク電流がある。これらの電流リプル低減のための着眼点は、「電源と電磁石列にノーマルモード電流に加えてコモンモード電流の概念を導入し、各モード電流を解析的に表現する。これによって電源の性能を制限している要因を調べ、電源及び電磁石列にリプル電流の共振抑制と低減の対策を施す」ことである。

コモンモード電流の概念を導入することにより、電源回路及び電磁石列回路に接地線を加え、（正、接地、負）ラインの入出力各3端子を持つ6端子回路網として回路を記述した。これから得られる回路方程式はノーマルモードとコモンモードが同時に表現できるマトリックス方程式に変形できることを発見し、モード混合が起こり得ることを式として示した。電磁石列は通常伝送回路として扱われるが、これをLCRの梯子型回路と見做し、リプル電流の通路としてコイル・鉄心間に存在する浮遊容量に注目した。電磁石の上下コイルを電流の行きと帰りとに分離結線することにより電磁石コイルが接地電位にある鉄心に関して対称回路を形成することに着目し、電源および電磁石列が接地線に関して完全対称であれば、コモンとノーマルの2つのモードに分離でき、それぞれを4端子網として独立に扱うことができることを示した。モード分離により電圧、電流、アドミッタンスが解析的に表現でき、周波数領域および時間領域におけるリプルおよびスパイク電流の解析解を導いた。また、コイル架橋抵抗を含む梯子型回路のコモンとノーマルモードの共振特性を解析的に記述した。これを実験的に検証するために電磁石列のアドミッタンスの周波数特性の測定を行い、解析解との良い一致を得ている。

リプル電流の解析として、コモンとノーマルモード夫々の電源出力端アドミッタンス（またはインピーダンス）を定義し、電磁石列各セルにおけるコモンとノーマルモード電流および電圧を定式化した。これより電流および電圧の共振特性が記述でき、リプル電流の空間分布および周波数特性を得た。さらに、共振抑制のためのコイル架橋抵抗の役割が定量的に理解できることを示した。また、スパイク電流解析として、電源出力端アドミッタンスを部分分数展開することにより、コモンとノーマルモードの共振周波数と減衰定数の定式化を行い、スパイク電流に対してもコイル架橋抵抗の働きが定量的に理解できた。さらに時間領域において、電圧のステップ変化によるコモンとノーマルモード・スパイク電流を解析的に記述した。

ノーマルモードに加えてコモンモード・フィルターの導入とコイル架橋抵抗による電流リプル低減を図り、更に、これらの手段では低減できない非論理リプル電流はアクティブフィルター及び低域通過フィルターを追加することによってリプル電流の各周波数成分を1 ppm以下に押さえることに成功し、遅いビーム取り出しにおいてリプル電流による影響のないビームスピルを、補正電源を使用することなく達成した。

低リプル電流のシンクロトロン電源を実現する過程で、コモンモード・リプル電流を低減するために回路対称化を図り、これによりリプル電流及びスパイク電流をモード別に解析的に表現し、それらの定量的把握を可能にした点は独創的であり、この分野

に新しい知見を与えるものとした高く評価された。

さらに、学位論文に関する専門知識及び基礎知識に関し、口述による試験を実施した。スパイク・ノイズ発生機構、論理・非論理リップル、コモン及びノーマルモード電流、多端子回路網、リップル電流測定方法などについて種々の質問を行い、これらに対して熊田君は的確に答え、十分な基礎知識と理解力を有していると思われる。学位論文及び提出された投稿中の副論文は英語で書かれ、その内容からみて外国語の能力も十分であると思われる。以上の点から熊田君は学位授与に相当する基礎学力を具備していると判断される。また、平成8年2月5日に実施された公開発表会にも合格した。

2月13日に開催された加速器科学専攻・放射光科学専攻合同委員会における審査経過概要の説明、論文審査結果及び試験結果に基づき、慎重に審議された結果、審査委員会の結論は妥当なものとして判断された。

これらの審査をふまえ、2月22日に開催された数物科学研究科教授会において最終的に了承され、平成8年3月21日葉山キャンパスにおいて学位が授与された。