

A NEW METHOD OF STATIC FILTER AND DYNAMIC FILTER FOR NORMAL-MODE NOISE AND COMMON-MODE NOISE IN AC-DC CONVERTERS AND DC-AC CONVERTERS

Kenji Sato¹

Osaka Electro-Communication Junior College
18-8 Hatsucho, Neyagawa, Osaka, 572-8530, Japan

Abstract

It has been noticed from measurement of waveforms of alternating current of an AC-DC converter of IGBT type that current noise consists of normal mode and common mode although voltage noise consists of only normal mode. A new method of a filtering system in alternating current for both of normal mode noise and common mode noise is proposed on the analogy of a well-established filtering system in direct current of an AC-DC converter of thyristor type.

交直変換器及び直交変換器の交流系統及び直流系統の 静的フィルター及び動的フィルターの新方式の提案

1. はじめに

交直変換器（交直は「交流 - 直流」の略称で、以下、同様）であるサイリスタ電源において、直流出力に対し、負荷を3端子入力で3端子出力の電気回路で上下対称な配置とし、電源も上下対称な配置として、ノーマル・モードとコモン・モードに対するフィルターを設けることで、静的フィルターのみでも、転流に付随する電流ノイズを数ppmにまで低減し抑制出来る。この方式に基づき、放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置HIMACのシンクロトロン電磁石用サイリスタ電源（2500V、2500A、台形励磁用繰り返し周期3秒パルス電源）や大阪大学核物理研究センターでの民間等との共同研究によるサイリスタ電源（210V、3000A）で、この高性能は実証済みである^[1,2]。HIMACでは、さらにリアクトル・トランス方式の動的フィルターを上下対称に設けることで、電流ノイズが10倍近く改善され、0.3ppmと言う、世界的にも例を見ないほどの高性能を実現している。直流出力側のこのフィルター方式は、国内のみならず世界的にも採用例はまだ数多くはないものの、既に確立された技術と言える。

これに対して、交流系統では転流に付随するノイズに悩まされ続けて来ており、特に、最新のIGBT電源では、スイッチングに付随するノイズが原因で、これまでのサイリスタ電源には見られなかったような、大きなトラブルが交流系統に発生している。

ところで、最近筆者は、J-PARC加速器研究施設で電源に関するセミナーを行う機会を得、それに際して、IGBT電源の交流系統の相間電圧と相電流の波形の測定データを入手出来る幸運に恵まれた。これらの測定データの位相をずらし、3つの相間電圧と3つの相電流に拡張し、それぞれの和を取ると、ゼロになるノイズとノンゼロのノイズとがあること

に気付いた。この解析の結果、相間電圧は和がゼロになるノーマル・モード・ノイズのみであるのに対して、相電流はノーマル・モード・ノイズと、和がノンゼロのコモン・モード・ノイズからなることが判明した。コモン・モード・ノイズでは3つの相電流の和がノンゼロであるから、その逆向きの電流が床や大地や地面を流れていることになり、この電流こそ、交流系統のトラブルの最大の原因と考えられ、それを低減し抑制する必要がある。

そこで、直流出力側では、負荷である電気回路を上下対称な配置とし、電源も上下対称な配置として、ノーマル・モードとコモン・モードに対するフィルターを設けた考えを交流系統にも適用し、交流系統の電気回路を上下対称な配置とし、ノーマル・モードとコモン・モードに対するフィルターを設けることによって、2つのモードのノイズを低減し抑制出来る、新しい方式の交流系統のフィルターを考案した。これにより、直流出力側と交流系統のいずれの電気回路も上下対称な配置でお互いに整合しており、全体として、均整が取れた美しい電気回路となる。

以上の交直変換器の直流出力側と交流系統のフィルターは、直交変換器にも適用可能であり、さらに、これらを組み合わせた、交直交変換器や直交直変換器にも適用可能であり、いずれの変換器においてもノイズの低減と抑制に有効である。

2. 直流出力側の機能分離型フィルターと機能結合型フィルター

通常の電源では直流出力は2端子であり、2つの出力電流の向きを逆に取ってI、Jと定義すれば、サイリスタの転流に付随するノイズには、(I-J)がゼロになるノイズと(I+J)がノンゼロになるノイズと

¹ E-mail: k-sato@isc.osakac.ac.jp

がある。(I-J)がノンゼロの電流に対しては、それと逆向きの電流が床や大地や地面を流れるので、これをコモン・モードと呼んだ。これに対して、(I-J)がゼロになるノイズをノーマル・モードと呼ぶことにしたが、実測では、このノイズは無視出来るほど小さかった。それは既設の従来方式のフィルターで低減され抑制されたためと考えられたが、こうした経緯については文献^[1]に詳しく述べたところである。

ところで、2つの出力電流を同じ向きと定義すれば、コモン・モード・ノイズでは和がノンゼロになり、ノーマル・モード・ノイズでは和がゼロになる。

逆向きで定義したときのノンゼロの(I-J)を低減し抑制するために、負荷を3端子入力で3端子出力の電気回路で上下対称な配置とし、電源も上下対称な配置とし、ノーマル・モードとコモン・モードに対するフィルターを設ければ良いことに気付いた。その結果、静的フィルターのみでも電流ノイズが数ppmと言う、高性能の世界が出現した。

放医研HIMACシンクロトロン電磁石電源^[1]や阪大RCNPでの民間等との共同研究による電源^[2]では、コモン・モードとノーマル・モードのそれぞれに対して独立したリアクトル・トランスを設けた。この方式を機能分離型フィルターと呼び、その模式図を図3と図4の直流出力側の静的フィルターとして示す。

これに対して、独立したリアクトルを2式上下対称に配置してやると、ノーマル・モードとコモン・モードに対して同時に作用するフィルターが可能である。この方式を機能結合型フィルターと呼び、その模式図を図2の直流出力側の静的フィルターとして示す^[3]。この方式に基づく大型電源は未だ製作されていないが、図2の配置に基づいて、市販の独立したスイッチング電源を2台直列に繋いだ試験が行われており、実測の結果、ノーマル・モードだけでなくコモン・モードのスイッチング・ノイズが激減することが示されている^[4]。

3. 交流システムのノーマル・モード・ノイズとコモン・モード・ノイズ

IGBT電源の交流システムで観測された電圧と電流の波形をそれぞれ図1の左上と左下に示す^[5]。電圧は3相の1つの相間電圧であり、電流は3相の1つの相電流であるが、いずれの波形でも商用周波数の交流電圧や交流電流の他に、スパイク状のノイズが見える。

これらの波形のそれぞれに対して、位相を120度と240度ずらした波形を作り、3つの波形の和を取る。

電圧の3つの波形の和に対しては、商用周波数の交流電圧の他、スパイク状のノイズも相殺し、ゼロになる。そこで、3相の和がゼロになるノイズをノーマル・モード・ノイズと呼ぶことにする。

電流に関しては、3相電流の向きを全て同じ向きに取ってI1、I2、I3と定義すると、3つの波形の和に

対しては、商用周波数の交流電流の他、(I1+I2+I3)が相殺してゼロになるノーマル・モード・ノイズがある。この他に(I1+I2+I3)がノンゼロになるスパイク状のノイズが存在する。このノンゼロの和の電流に対しては、それと逆向きの電流が床や大地や地面を流れるので、コモン・モードと呼べば良い。

以上により、交流システムの相間電圧のノイズはノーマル・モードのみであり、相電流のノイズはノーマル・モードとコモン・モードからなることが判明した。しかし、筆者にとってはこの結果には意外な点があった。直流出力ではフィルターによりノーマル・モードは低減され抑制されていたのに対して、交流システムではノーマル・モードさえ低減され抑制されていない。要は、ノーマル・モードに対してさえフィルターがないのである。従って、交流システムでは、ノーマル・モードとコモン・モードに対する2種類のフィルターが必要とされることは明らかである。

B電源運転時の系統電圧

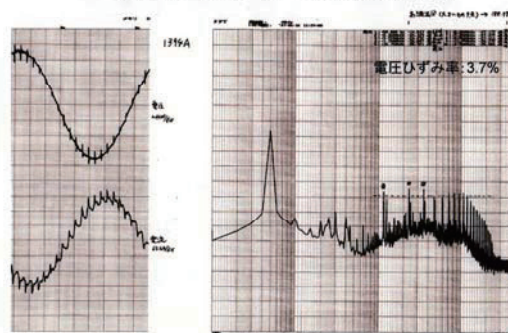


図1 交流システムの電圧波形と電流波形

4. 交流システムの機能結合型フィルターと機能分離型フィルター

交流システムのコモン・モード・ノイズでは3相電流の和(I1+I2+I3)がノンゼロであることから、この和を1本の線、即ち、単線と等価であると考えれば良い。ところで、この単線を第2章で議論した直流電源の2端子出力の一方と考えると、コモン・モード・ノイズを低減し抑制するためには、電気回路を上下対称な配置にする必要があるため、もう1本単線が必要であり、従って、交流システムにはもう1本の単線に相当する3相電流を上下対称な配置にしなければならない。

ところが、幸いなことに、直流出力を上下対称な配置とするため、交流システムのトランスを元々スター・デルタの配置としており、従って、交流システムは自動的に上下対称な配置となっている。

交流システムのコモン・モード・ノイズは3相電流の和として単線を流れる電流と見做せることから、直流出力の例からして、交流システムのコモン・モード・

フィルターとしては、3相電流を一纏めにして、1つの鉄芯に共巻きしたリアクトルが可能である。

しかし、3相交流を共巻きにしたリアクトルはノーマル・モードを低減し抑制するためには有効ではない。ノーマル・モードに対しては、3相交流のそれぞれの相毎に独立したリアクトルを用いるか、または、従来の方式である相間電圧に対して設けられている高調波フィルターを用いるかの、2通りのフィルターが考えられる。

以上を組み合わせることによって、交流系統に対しては、機能分離型と機能結合型の2種類のフィルターが考えられる。

交流系統の機能結合型フィルターは、直流出力に対する図2に示した機能結合型フィルターに相当するもので、3相交流のそれぞれにリアクトルを用いる方式であり、その模式図を図2に示す。

交流系統の機能分離型フィルターは、直流出力に対する図3及び図4に示した機能分離型フィルターに相当するものであるが、3相電流の和である単線にはコモン・モード・ノイズのみが含まれるので、2通りの方式が考えられる。交流系統の上半分と下半分の3相電流をそれぞれ独立に共巻きにしたリアクトルを使用する場合(図3)と、6相電流の全てを共巻きにした1つのリアクトルを使用する場合(図4)が考えられる。いずれの場合も、ノーマル・モード・ノイズに対しては、従来から使用されて来た、相間に設けられる高調波フィルターを採用すれば良い。以上を組み合わせ、交流系統に対する機能分離型フィルターとしては2通りあり、それらを図3と図4に示す。

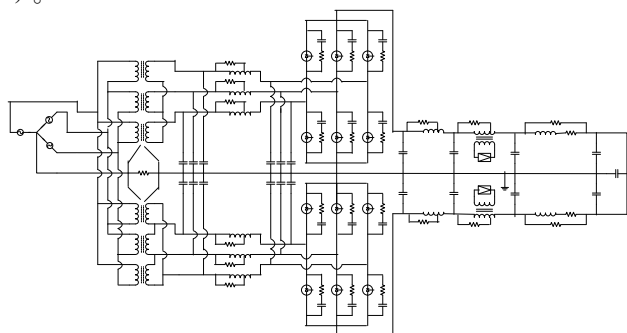


図2 交流系統の機能結合型フィルターと直流出力側の機能結合型フィルター

5. 直交変換器、交直交変換器、及び、直交直変換器への適用

図2、図3、及び、図4に示した交直変換器の配置の逆の配置が直交変換器である。直流を交流にするとき、3相交流を2組生成し、交流系統を一度上下対称な配置にし、直流前後でのスイッチング・ノイズを低減し抑制した後、結合用トランスで1組の3相交流に合成することが、新しい方式の特徴である。

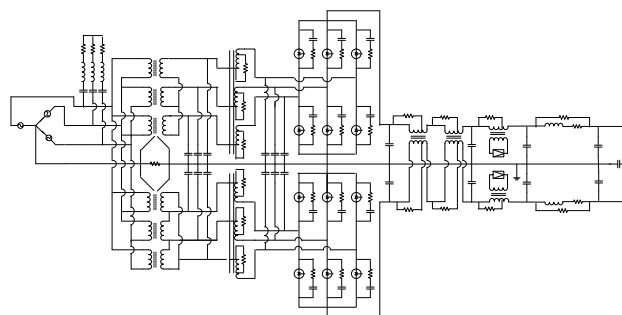


図3 交流系統の3相電流共巻き機能分離型フィルターと直流系統の機能分離型フィルター

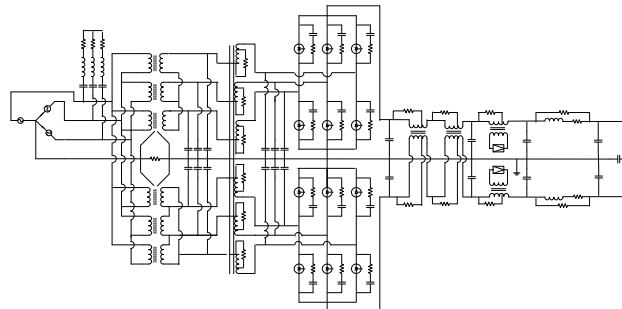


図4 交流系統の6相電流共巻き機能分離型フィルターと直流系統の機能分離型フィルター

交直変換器と直交変換器を組み合わせることで、交直交変換器や直交直変換器を構成することが出来る。そのとき、中線が直流と交流の全てに対して共通で、その中線の周りに、電気回路の全てが上下対称な配置になる。これにより、いずれの変換器もスイッチング・ノイズを低減し抑制することが出来る。

6. 議論

交流系統の機能分離型フィルターとして、上半分と下半分のそれぞれの3相電流を1つのリアクトルに共巻きする方式と、上下の6相電流の全てを1つのリアクトルに共巻きする方式を提案した。どちらの効果も同じである気がするが、釈然としていない。数式的な解析が必要であろう。

参考文献

- [1] 佐藤健次、“重イオン・シンクロトロン加速器技術と物理・その1 - 電源と電気回路としての電磁石負荷：コモン・モード・ノイズとの格闘 -”、“加速器”、Vol.3、No.1、2006 (10-23)
- [2] 田浦裕樹、“シンクロトロン用高性能電源の研究”、修士論文、大阪大学、1999年
- [3] K.Sato and H.Toki, “Synchrotron magnet power supply network with normal and common modes including noise filtering”, NIM A 565(2006)351-357
- [4] 福田光宏、私信。阪大RCNPで2台の電源を組み合わせで測定中であり、定量的な詳細報告が俟たれる。
- [5] 岡村勝也、“B電源運転時の系統電圧”、J-PARC加速器担当者打ち合わせ資料、H19-5-25