

氏名（本籍）	ふじ しろ よし かず 藤 城 義 和（千葉県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第842号
学位授与の日付	平成26年3月20日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	マルチポート回路における伝送特性の群論的 な視点に基づいたモード解析

論文審査委員	（主査）教授 越地 耕二
	教授 前田 譲治 教授 榎田洋太郎
	教授 盛永 篤郎 教授 岡田 裕

論文内容の要旨

対称性は電気回路解析にどのような影響を及ぼすのであろうか。この素朴な疑問が本研究の出発点である。対称性に対する認識は、潜在的には、文明の発祥あるいはそれ以前からあったと考えられるが、学問として登場するのは、200年ほど前のことに過ぎない。以降、急速にその内容を深化させ、理工学の根底に位置する極めて基本的な概念として広く認知されるに至った。しかし、電気工学の分野においては、断片的な知識がいくつか存在するだけで、また活用も進んでいるとは言えない。それらの断片を群論的な観点から統一化できれば、そこには今までになかった見晴らしの良い眺めが待ち受けているに違いない。

本研究で取り組んだ課題は、①複雑な対称性への拡張と②非対称な場合の取り扱いの2つの方向に分けることができる。前者は、対称性を利用して回路を分割し、より小さなもので全体を把握しようという試みである。回路が小さくなった分、見通しが効くようになり、またコンピュータシミュレーションなどの効率向上にもつながる。最初に3相回路をとりあげる。対称性としては、最も単純な鏡映対称よりも、もう一段高だけであるが、その特性は直感的には把握しづらい。そこで、対称性に基づいた新たな評価基準を考案し、解析手法の深耕に努める。さらに、それらを土台にして2等分定理の拡張に挑む。より複雑な対称性を有する場合に対応できるよう、モード理論の枠を拡張し、その上で電気回路を群論的な視点から眺めることにより、回路図上に対称性を表現する。最初に、ある程度感觸のつかめている2等分（平衡回路）と3等分（3相回路）の場合で経験を積み、それを基に多等分に駆け上がる。

一方、後者は、ほぼ対称であるがわずかにずれている場合、それをどのように評価、解

析すべきか検討したものである。非対称性の程度を電氣的な特性として定量化し、その解析方法を考案する。その結果、本研究で扱った例では、対称性が悪くなるほどモード変換量が大きくなる傾向にあることがわかった。環境電磁工学(EMC)の分野では、コモンモードが一つのキーワードであるが、その発生要因にはこのような非対称性の存在がある。本検討はその機構の解明と制御に貢献する。

以下に、結果概要と今後の課題を記す。

3相フィルタの新しい評価・解析手法

3相フィルタの新しい評価基準「Fortescue モードSパラメータ」を提案する。それは、対称座標法、すなわち零相/正相/逆相のモードに変換したSパラメータである。3相交流下でのフィルタの伝送特性は、このSパラメータに全てが現れている。正相/逆相の特性は、3相交流の主成分(3ライン間の位相が ± 120 度ずつ異なる)に対する応答を、零相の特性は、同相のノイズに対する応答を示している。また、非対角ブロックの特性は、モード変換(相間の相互作用)、したがって非対称性を表している。さらに、これらの知見を基に、Fortescue モードSパラメータに即した等価回路の作成方法を考案する。等価回路は、構成素子の影響を予測可能にし、またシミュレーションなどに組み込んで計算するときの負荷軽減に役立つ。このことは、この新しい手法が、単に測定・評価だけでなく、解析や設計にも有効であることを示している。また、従来法である CISPR 17 - ed. 2.0 (2011)の Asymmetrical / Symmetrical 挿入損失の物理的な意味を明らかにするとともに、新旧データの比較方法についても言及する。この評価法および等価回路解析は、3相フィルタの設計において、試行錯誤や経験則からの脱却を促す。

2等分定理の拡張

Bartlett の2等分定理を、より複雑な対称性を有する場合に拡張する。最初に、群の表現を援用したモード理論を構築する。それを土台にして、電気回路を群論的な視点から眺めることにより、モードの回路行列に対応した等価回路の導出方法を見出す。簡単な回路を例にとることで、回路図の節点の状態に対する判定条件を帰納的に導き、それを基に一般論を展開する。モードの属している既約表現が、その節点の固定部分群の恒等表現になっている場合は、同一軌道の枝どうしは開放に、恒等表現以外の場合は、節点は仮想接地になる。この判定条件は、人間の判断を要さないため確実であり、またコンピュータなどで自動判定させることも可能である。これらの知見を用いれば、より小さな回路を有限個組み合わせるだけで、回路全体を特性づけることができる。このことは、回路の見通しを良くし、また大規模な回路や構造体に適用した際には、コンピュータシミュレーションの計算量や記憶量の節約などに寄与する。本研究は、理論的考察を主体としているが、検証の際に、一部、電磁界シミュレーションを用いている。それは、本理論が集中定数回路だけでなく、分布定数回路にも適用可能であることの例になっている。今回の対象は電気回路であるが、線型時不変な系であれば他分野であっても、この手法を活用することが可能である。

平衡回路における非対称性の評価と解析

代表的な平衡回路であるコモンモードフィルタや結合線路を題材に、その非対称性について理論的な解析を行う。最初に、評価指標の分類とその相互関係を明らかにし、その上で、非対称性がどう特性に反映されるかを導く。一般に、非対称性が強くなるほど、モード変換量が大きくなると予想されるが、本研究で扱った例においては、その予想は妥当であることが確認される。また、コモンモードフィルタについては、ミックスモードS行列の非対角ブロックの位相特性によって、非対称性の要因が判別可能であることを明らかにする。反射特性と伝送特性が同位相であれば容量性の、逆位相であれば誘導性の不平衡が支配的である。また、その過不足の状況を位相角の符号から読み取ることもできる。これらの知見を応用すれば、コモンモードフィルタの非対称性を補償することや、測定値から支配的な要因を特定し、構成改善の指針を得ることが可能となる。対称性を制御したものづくりへと展開していきたい。

今後の課題

本論文で扱ったSパラメータは基準インピーダンスを正数に限定したもの、すなわち、抵抗終端したときの特性であった。しかし、現実には純粋な抵抗で終端されることはなく、また、本研究の題材である3相フィルタに関して言えば、モータなどの誘導負荷で用いられることも多いため、本格的な応用に際しては、シミュレーションの併用(Sパラメータや等価回路をシミュレータに取り込み、周辺回路を配置して実動作を模擬する)などで対処する必要がある。それを解消する手段として、「基準インピーダンスを複素数にまで拡張したSパラメータ」の活用が考えられる。しかし、それにはいくつかの流儀が存在し、その内のどれが適しているのか、あるいはもっと別な指標が良いのか、今後の研究の進展が望まれる。

非対称性については、まだまだ不明な部分も多く、特に理論面では解明が進んでいない。本研究では、モード変換によって非対称性を定量化したが、放射ノイズとの関連性については、手を付けられていない。非対称性に起因する放射電磁界は、どのような指標で評価すべきなのか、その場合もモード変換量が有効なのか、あるいはもっと別なもの(対称度とか)が良いのか、理論的な解明が期待される。

まとめ

3相フィルタの伝送特性の評価やコモンモードフィルタにおける非対称性の要因分析など、具体的な課題に取り組みつつ、背後にある対称性あるいは非対称性について、そのからくりを明らかにした。すなわち、群の表現を援用することで、マルチポート回路における伝送特性を、より高い視点からモード解析することができた。このことは、対称性という極めて基本的な概念が電気工学の枠組みに融合されたことを意味している。

論文審査の結果の要旨

対称性が電気回路解析に与える影響は、断片的な知識がいくつか存在するが、系統立てた理論が確立されるまでには至っていない。本論文では、群論的な観点から現存する断片を整理するとともに、不十分な個所には新規知見を追加し、統一的に取り扱えるよう研究を行っている。取り組んだ課題は、①複雑な対称性への拡張と②非対称な場合の取り扱いの2つの方向に分類できる。前者は、対称性を利用して回路を分割し、より小規模なもので全体の把握を試みている。回路が小さくなった分、見通しが効くようになり、またコンピュータシミュレーションなどの効率向上にもつながる。一方、後者は、ほぼ対称であるがわずかにずれている場合、それをどのように評価、解析すべきか検討したものであり、非対称性の程度を電氣的な特性として定量化し、その解析方法を考案している。環境電磁工学の分野では、コモンモードが一つのキーワードであるが、その発生要因にはこのような非対称性の存在があり、その機構の解明と制御は大きな課題である。本論文は6章で構成されている。

第1章は序論であり、歴史的な経緯を述べ、その流れの中で本研究の位置づけを明らかにするとともに研究の目的および概要を示している。

第2章は、既存技術の整理を兼ね、鏡映対称な回路の解析を紹介している。ミックスモードSパラメータの定義と性質を述べ、Bartlettの2等分定理を概説するとともに、平衡フィルタを例にして、実測と等価回路解析で検証を行っている。

第3章では、3相フィルタの新しい評価基準「FortescueモードSパラメータ」を提案している。それは、対称座標法、すなわち零相/正相/逆相のモードに変換したSパラメータである。正相/逆相の特性は、3相交流の主成分に対する応答を、零相の特性は、同相のノイズに対する応答を示している。また、非対角ブロックの特性は、相間の相互作用、したがって非対称性を表している。3相フィルタは、対称性としては最も単純な鏡映対称よりも、もう一段高いだけであるが、その特性は直感的には把握しづらい。本評価法はその一つの解消手段と言える。また、FortescueモードSパラメータに即した等価回路を導入し、その作成方法を考察している。等価回路は、構成素子の影響を予測可能にし、またシミュレーションなどに組み込んで計算するときの負荷軽減に役立つ。このことは、これらの新しい手法が、単に測定・評価だけでなく、解析や設計にも有効であり、3相フィルタの設計において、従来の試行錯誤や経験則による非効率的な手法とは異なり、客観性、合理性が高く、効率的であることを示している。

第4章では、Bartlettの2等分定理を、より複雑な対称性を有する場合に拡張している。群の表現を援用したモード理論を構築することにより、モードの回路行列に対応した等価回路の導出方法を見出した。簡単な回路を例にとることで、回路図の節点の状態に対する判定条件を帰納的に導き、それを基に一般論を展開している。この判定条件は、人間の判断を要しないため確実であり、またコンピュータなどで自動判定させることも可能である。これらの知見から、より小さな回路を有限個組み合わせるだけで、回路全体を特性づける

ことができる。このことは、回路の見通しを良くし、また大規模な回路や構造体に適用した際には、コンピュータシミュレーションの計算量や記憶量の節約などに寄与する。

第5章では、代表的な平衡回路であるコモンモードフィルタや結合線路を題材に、その非対称性について理論的な解析を行っている。最初に、評価指標の分類とその相互関係を明らかにし、その上で、非対称性がどう特性に反映されるかを導く。一般に、非対称性が強くなるほど、モード変換量が大きくなると予想されるが、本研究で扱った例においては、その予想は妥当であることが確認され、コモンモードフィルタにおいては、ミックスモードS行列の非対角ブロックの位相特性によって、非対称性の要因を判別することが可能であることを見出した。これらの知見から、コモンモードフィルタの非対称性を補償することや、測定値から支配的な要因を特定し、構成改善の指針を得ることが可能となる。

第6章は結論であり、本論文の意義をまとめている。そして、残された課題を挙げ、その展望について述べている。

以上、本論文では、群の表現を援用することにより、3相フィルタなどのマルチポート回路における伝送特性のモード解析やコモンモードフィルタにおける非対称性の要因分析などを行い、その数学的、定量的な取り扱いを明らかにしている。

本論文で得られた成果は、対称性という極めて基礎的な概念を電気工学の枠組みに融合させたことにある。そのことは電気回路学の基礎理論分野に一石を投じるとともに、伝送工学や環境電磁工学の分野において大きく寄与するものである。よって、博士(工学)の論文として合格と認める。