

氏名	よねもとあきひろ 米本明弘
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博第2355号
学位授与の日付	平成16年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工学研究科電気工学専攻
学位論文題目	Study on Numerical Laplace Transforms and Their Applications to Analysis of Transmission Lines (数値ラプラス変換とその伝送線路解析への応用に関する研究)
論文調査委員	(主査) 教授 奥村浩士 教授 島崎真昭 教授 萩原朋道

### 論文内容の要旨

本論文は、近年の高速信号伝送線路の波形評価や電力系統の過渡現象解析の基礎となる実用的なFFT型数値ラプラス変換の順変換ならびに逆変換について、新しい計算アルゴリズムを提案するとともに、それをリアルタイムで行う専用プロセッサを実現し、伝送線路の故障点標定への応用について研究した成果をまとめたものであって、8章から構成されている。

第1章は序論であり、この研究に至る歴史的背景ならびに動機と目的を述べている。

第2章では従来のFFT型数値逆ラプラス変換は表関数  $f(t)$  の計算区間の後半部では誤差が著しく増大すること、ならびにこれまで提案の少ないFFT型数値順ラプラス変換では裏関数  $F(s)$  の計算区間の後半部で別名効果が生じることを解析的に示している。さらに両変換を対として用いるため、後半部分のデータを棄却し、失われたデータ点を内挿補間によって補うという従来の順逆ラプラス変換対の解析を行っている。

第3章ではFFT型数値逆ラプラス変換の詳細な誤差解析を行い、打ち切り誤差の評価式を導いている。ついで、裏関数  $F(s)$  の減衰を加速することによって打ち切り誤差が低減できることを示している。すなわち、 $s$  領域において裏関数  $F(s)$  を  $s$  の  $i$  乗 ( $i$ : 正整数) で除算した結果にFFT型数値逆変換を施し、得られた結果を  $t$  領域で  $i$  回数値微分することにより表関数  $f(t)$  を得る。この手法によって、FFT型数値逆変換の打ち切り誤差が著しく改善され、得られた  $t$  領域の計算区間全体を逆変換の結果として採用可能であることを数値例を用いて示している。さらに、この手法により不連続点におけるギブス現象の発生を回避できることを数値的に明らかにしている。

第4章では新しいFFT型数値ラプラス変換対を提案している。第2章で示したそれぞれの変換の後半部分の内挿補間について詳細な解析を行い、棄却された後半部分のデータ点は直前の処理で補間されたものであることを解析的に明らかにしている。そこでこの不要な補間と棄却の処理を無くすには、表関数  $f(t)$  の後半部分を常にゼロとし、裏関数  $F(s)$  の後半部分を常に前半部分の折り返し複素共役にとればよいことを示している。さらに、第3章のFFT型逆変換の誤差改善手法を適用して、逆変換した表関数  $f(t)$  の有効範囲を延長し、飛躍的な計算効率向上と誤差の低減が実現できることを数値例を用いて明示している。

第5章ではリアルタイムでのデータ処理を目的として、FFT型数値ラプラス順逆変換のハードウェア設計を行い、ラプラス変換プロセッサを提案している。すなわち、FFTのバタフライ演算構造に着目し、回路規模を小さくするため、擬似浮動小数点による実装を提案している。この提案手法によりFFT順変換では15ビットの精度が得られ、逆変換では9ビットの精度が得られることをFPGA上の実装により確認している。

第6章では伝送線路の過渡現象への数値ラプラス変換の応用について言及している。とくに、数値計算上の視点から伝搬定数行列の指数関数行列を精度良く計算する手法について述べている。

第7章では単相および三相の無損失伝送線路を想定し、一線地絡故障および線間短絡故障の際に生じる電圧・電流波をラプラス変換により考察している。まず、無損失単相線路において現れる過渡波形が直交関数系のラゲール関数で表現される

ことを明らかにし、その直交性を利用した故障点標定法を提案している。また、数値逆ラプラス変換を用いて大地の表皮効果を数値的に評価し、単相線路では過渡波形が著しくなまりラゲール関数では表現できないことを示している。ついで、無損失三相線路の短絡故障について検討し、短絡時の過渡波形が同じくラゲール関数で表現できることを示すとともに、三相線路の場合には大地の影響を受けない線間モードが許容されるため提案された故障点標定法が有効であることを数値シミュレーションによって確認している。

第8章は結論であり、本研究で得られた成果を要約している。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、近年の高速信号伝送線路の波形評価や電力系統の過渡現象解析の基礎となる実用的なFFT型数値ラプラス順逆変換について、新しい計算アルゴリズムを提案するとともに、それをリアルタイムで行う専用プロセッサを実現し、伝送線路の故障点標定への応用について研究した成果をまとめたものである。得られた主な成果はつぎの通りである。

1. FFT型逆ラプラス変換の誤差解析を行い、誤差の低減手法を提案し、従来困難であった不連続点におけるギブス現象を解消した。
2. FFT型数値ラプラス変換対について検討し、従来行われていた補間とデータの棄却という処理をすることなく、数値ラプラス変換対を構成した。
3. FFT型数値ラプラス変換対の専用プロセッサを擬似浮動小数点を用いてFPGA上に実装し、逆変換で9ビット、順変換で15ビットの精度で動作することを確認した。
4. ラプラス変換によって無損失単相、三相伝送線路の過渡波形が直交関数系のラゲール関数と一致することを見出し、その直交性を利用した故障点標定法を提案するとともに、大地の表皮効果を考慮した三相線路を本数値逆ラプラス変換によって解析し、提案した故障点標定法が有効であることを示した。

以上要するに、本論文は、FFT型数値ラプラス順逆変換の新しい計算アルゴリズムを提案するとともに、ハードウェアによってそれを実現し、伝送線路故障点標定への応用を検討したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成16年1月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。