

博士学位論文審査要旨

2013年2月13日

論文題目: Wave Propagation on Covered / Cabtyre Cables and Modeling for Inverter Surge Analysis
被覆/キャブタイヤケーブルにおける波形伝搬とインバータサージ解析のためのモデル化

学位申請者: Asha SHENDGE

審査委員:

主査: 理工学研究科 教授 雨谷 昭弘

副査: 理工学研究科 教授 長岡 直人

副査: 三菱電機株式会社 天満 耕司

要旨:

近年、スマートグリッドが大きな話題を集め、各種の研究が進められている。このスマートグリッドに関わる重要な課題の一つとして、電気エネルギー利用効率化に関わる技術がある。その代表的応用例としてインバータ制御エアコンなどのインバータ制御モータ関連技術が挙げられる。このインバータ制御モータ系では、インバータとモータの接続に、複数の被覆電線を密着させたキャブタイヤケーブルが広く用いられている。また中・小規模の変電所・電力施設では電力機器と制御系を接続する被覆電線が建物床上に多数密接し敷設、利用されている。このように大地および他の導体に近接している絶縁導体系での波形伝搬および過渡電圧・電流特性は未だ十分に解明されておらず、これらの相互誘導に起因すると推測される事故例も多く報告されている。特にインバータ制御モータ系の場合には、インバータが高調波およびサージの発生源となるためモータに対してのみならず、接地系を介して他機器への障害を引き起こす事例がある。

本研究では上記を考慮して導体が大地あるいは他の導体と近接して敷設されている場合の波形伝搬および過渡電圧・電流特性を明らかにしようとしている。

本論文第1章では研究の背景、未解明の課題および本研究の概要を述べている。

第2章では本研究の理論的背景となる分布定数回路論、理論解析に必要な被覆導体系（キャブタイヤケーブル、パイプタイプケーブル）のインピーダンス、アドミタンス理論式、3芯キャブタイヤケーブルを解析するための対称座標変換法、過渡現象での進行波解析のための格子図法について説明している。

第3章では本研究での数値シミュレーションに用いる汎用回路解析プログラム EMTP および数値電磁界解析手法の一種である FDTD 法による汎用プログラム VSTL の概要について述べている。

第4章では波形伝搬特性に対する単相架空被覆導体の地上高および2相の架空被覆導体系での離隔距離の影響について、実験および汎用回路解析プログラム EMTP および数値電磁界解析プログラム VSTL を用いたシミュレーションにより検討し、導体地上高および導体間離隔距離が小さい場合、従来の回路解析で一般に広く利用されている Carson・Pollaczek の大地帰路インピーダンスおよび平等電界仮定のアドミタンス理論式の適用には問題があることを確認している。これは導体間の近接効果の影響であり、近接効果を考慮できる理論式の導出が必要であると述べている。

第5章では金属円筒（パイプ）導体中に布設された導体系（パイプタイプケーブル）インピー

ダンスに対するパイプ内半径 r_p とパイプ中心から導体迄の距離 d の比で定まる偏心率 d/r_p の影響について、EMTP のケーブル定数計算ルーチン Cable Constants に内蔵されている Brown・Rocamora のインピーダンス、アドミタンスを用いて解析を行なっている。その結果、導体抵抗 R 、減退定数 α は偏心率に比例して大、インダクタンス L 、特性インピーダンス Z_0 は反比例して小となることを示している。この特性は周波数が高い程、顕著となることも明らかにしている。更に、EMTP を用いて過渡電圧・電流のシミュレーションを行い、電流は偏心率に比例して大、電圧は逆に小となることを明らかにしている。また、実験により波形伝搬および過渡電圧・電流特性を測定し、上記解析結果を裏付ける測定結果を得ている。

第 6 章では 3 芯キャブタイヤケーブルの波形伝搬特性の実験を行い、実験結果と VSTL シミュレーション結果が概ね良好に一致することを示している。この結果に基づき実験結果から、EMTP 過渡解析のための周波数依存線路モデルを作成する手法を説明し、Semlyen の理論に基づく周波数依存キャブタイヤケーブルモデルを作成している。この周波数依存モデルを用いてインバータ制御モータ系でのサージ解析を行い、周波数依存効果を考慮しない線路モデルでは妥当な結果が得られず、キャブタイヤケーブルを含む回路系でのサージ解析に際してはその周波数依存結果を考慮すべきであることを述べている。

第 8 章では本研究の成果を取りまとめている。

本研究では、これまであまり検討されていなかった被覆/キャブタイヤケーブルでの波形伝搬特性およびこれに関わる近接効果に伴う波形伝搬特性について実験および数値シミュレーションにより解析し、周知の架空導体系での波形伝搬特性とは大きく異なることを明らかにしている。これに伴いキャブタイヤケーブルでの過渡電圧・電流のシミュレーションに必要な周波数依存モデルを作成し、その計算精度を確認している。

以上の成果はスマートグリッド技術の一つの課題であるインバータ制御モータの研究に大きく貢献するものであり、その工学上の価値は大きい。従って、本論文は博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2013年2月13日

論文題目： Wave Propagation on Covered / Cabtyre Cables and Modeling for Inverter Surge Analysis
被覆/キャブタイヤケーブルにおける波形伝搬とインバータサージ解析のためのモデル化

学位申請者： Asha SHENDGE

審査委員：

| | | | | |
|----|----------|----|----|----|
| 主査 | 理工学研究科 | 教授 | 雨谷 | 昭弘 |
| 副査 | 理工学研究科 | 教授 | 長岡 | 直人 |
| 副査 | 三菱電機株式会社 | | 天満 | 耕司 |

要 旨：

博士論文提出者は、2010年4月より、文部科学省国費留学生として本学理工学研究科博士課程（後期課程）に在学中である。

本論文の主たる内容はJICEE, Ciit Int. Journal, Int. J. Advanced Tech., 理工学研究報告に各1件掲載され、十分な評価を得ている。

2013年1月26日午前10時より2時間にわたり、提出論文に関する学術講演会が開かれ、種々の質疑・討論が行なわれたが、提出者の質問により十分な理解が得られた。

さらに、講演会終了後、審査委員により学位論文に関連した諸問題につき口頭試験を実施した結果、十分な学力を確認できた。なお、提出者は本学での日本語の語学試験に合格しており、また国際学会での英語による講演および英語論文の発表も行なっており十分な語学能力を有すると認められる。

よって総合試験の結果は合格であると認められる。

博士學位論文要旨

論文題目： Wave Propagation on Covered / Cabtyre Cables and Modeling
for Inverter Surge Analysis
被覆/キャブタイヤケーブルにおける波形伝搬とインバータ
サージ解析のためのモデル化

氏名： Asha Shendge

要旨：

Due to modernization and globalization of world power system and smart grid technologies, the design of an electric power system is needed to be more accurate to ensure that equipment items or systems will not interfere with or prevent each other's correct operation through spurious emission and absorption of electromagnetic interference. The electrical power system involves a number of challenging technologies connected with network systems. It is necessary to study in consideration unintentional generation, propagation and reception of electro-magnetic energy. A wave propagation characteristic on a conductor and cable system represents the significance for proper insulation design and EMC related problems due to switching and lightning over voltages. It helps to design accurate protection in order to achieve stable and reliable electrical power system operation.

Chapter 2 describes basic formulae for line and cable constants for an analysis of a wave propagation characteristic on a conductor /cable system used. In a multi-phase transmission line, the wave propagation is evaluated by a modal analysis method.

Chapter 3 describes numerical simulation methods used in this thesis. A numerical electromagnetic analysis is becoming a very powerful approach to solve a transient by circuit-theory based approach is EMTP. Finite Difference Time Domain (FDTD) method to the solution of electromagnetic propagation problems is based on discretized Maxwell equations. Visual System Test Lab (VSTL) software developed by CRIEPI is adopted.

Chapter 4 describes the measurements, and numerical simulations are carried out to derive theoretical approach for the case of a hollow pipe conductor in consideration of the proximity effect. The phenomena is investigated using FDTD simulations of an experimental circuit. The FDTD demonstrates that the proximity effect has appreciable significance for conditions in proximity with ground. In addition, an eccentricity phenomenon is studied.

Chapter 5 describes an investigation on a single covered conductor in comparison with a bare conductor. The influence of permittivity and proximity is examined by an experiment and a simulation as a function of the height.

To observe the influence on wave propagation on covered conductors in close proximity, which cause mutual induction to each other, surge propagation is studied as a function of the separation distance for the two-conductor system.

Chapter 6 concentrates to study a cabtyre cable. A frequency dependent line model is very significant for an accurate analysis of line and cable transients. A methodology has proposed to obtain a frequency-dependent distributed-parameter line model for the cabtyre cable employing an exponential curve fitting from a measured transient voltage and an injected current. In addition, the effects of height on cable parameters in transient conditions for all propagation modes are studied.

The cabtyre cable model developed in this Chapter is examined by a practical measurement of an inverter surge. Numerical simulations of the inverter surge are carried out using a frequency dependent Semlyen's line model in the EMTP of which the required parameters are determined from measured results of the wave propagation characteristic on the cable. A simple model of an induction motor is proposed considering resonances in the motor. The simulated result by the EMTP agrees reasonably with a measured result. The proposed model is expected to be useful for the prediction of peak voltages observed at the terminal of an inverter-operated motor with cabtyre cable connection.