

# 博士学位論文審査要旨

2014年1月7日

論文題目： Modeling of Corona Discharge and Its Application to a Lightning Surge Analysis in a Power System  
(コロナ放電のモデリングと電力システムの雷サージ解析への応用)

学位申請者： Tran Huu Thang

審査委員：

主査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 雨谷 昭弘

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 馬場 吉弘

副査： 電力中央研究所 上席研究員 野田 琢

要 旨：

停電や瞬時電圧低下を引き起こす主要因の一つが雷であり、電力システムの効率的な耐雷対策を立案するためには、雷サージ解析技術を高度化する必要がある。架空送電線や配電線が雷撃を受けると、導体表面の電界が高まり、コロナ放電が発生することが知られている。例えば、送電線や配電線の最上部に、主として雷遮へいの目的で設けられている架空地線に雷撃があると、架空地線からのコロナ放電により、架空地線のサージインピーダンスは低下し、電力線との結合は増加する。これにより、鉄塔への流入電流は減少し、電力線電圧は上昇し、アークホーン間電圧が抑制される。さらに、架空地線を伝搬する雷サージ電圧は変歪を受ける。以上により、送電系統や変電所に発生する雷サージ過電圧はコロナ放電により大きく変化し、その絶縁設計・協調も大きく変化する。したがって、雷撃に伴う送電線や配電線で生じるコロナ放電モデルの開発は極めて重要な研究課題である。また、コロナ放電に伴う電磁界は近傍の通信線への誘導障害を引き起こすこともあり、いわゆる電磁誘導障害の観点からもコロナ放電のモデリングは重要である。

雷撃に伴う送電線でのコロナ放電現象解析に関しては汎用回路解析プログラム EMTP 上での計算モデル、コロナ放電の物理性を考慮した工学モデル等が広く利用されている。しかし、最近、サージ解析の有力な手法として注目を集めている数値電磁界解析手法で使用可能なコロナ放電モデルが開発されるには至っていない。

本研究では、数値電磁界解析手法の一種である時間領域有限差分 (finite difference time-domain: FDTD) 法によるコロナ放電モデルを開発し、その妥当性を実測結果との比較により検証し、送電線への雷サージ解析に応用している。

第1章では、研究の背景と概要について述べている。

第2章では、従来の回路論によるサージ解析手法を概説するとともに、FDTD法の原理、これに基づくサージ計算法について説明している。

第3章では、FDTD計算用のコロナ放電モデルを提案し、その妥当性を検証している。具体的には、コロナ放電発生時の水平単導体の電荷-電圧特性、コロナ放電電流、水平二導体間の結合率(誘導)の上昇、サージ電圧の伝搬に伴う変歪に関する実測結果と、提案するコロナ放電モデルを用いたFDTD計算結果との比較を行い、両者が良好に一致することを確認している。

第4章では、第3章の成果に基づき、架空送電線の雷サージ解析を実施し、架空地線からのコロナ放電の発生により、アークホーン間電圧が低下することを明らかにしている。さらに、架空配電線の近傍に雷撃を受け、そこから放射される電磁界パルスにより架空配電線に誘導される電圧を解析し、架空配電線からのコロナ放電の影響により、誘導雷サージ電圧が上昇するという新事実を明らかにし、その物理的説明を与えている。

第5章では、本論文の成果を簡潔にまとめている。

本論文は、時間領域有限差分法を用いた電力システムの雷サージ解析技術に関する先駆的かつ実用的な研究であり、これらの成果はこの分野の発展に多大なる貢献をなすものである。

よって本論文は博士（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

2014年1月7日

論文題目： Modeling of Corona Discharge and Its Application to a Lightning Surge Analysis in a Power System  
(コロナ放電のモデリングと電力システムの雷サージ解析への応用)

学位申請者： Tran Huu Thang

審査委員：

主査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 雨谷 昭弘  
副査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 馬場 吉弘  
副査： 電力中央研究所 上席研究員 野田 琢

要 旨：

博士論文提出者は本学工学研究科博士課程（前期課程）を2011年3月修了し、引き続き後期課程に在学中である。

本論文の主たる内容はIEEE Trans. EMCに3件、IEEE Trans. PWRDに1件掲載され十分な評価を得ている。

2013年12月14日午後1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・討論が行われたが、提出者の説明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問を実施した結果、十分な学力を確認できた。なお、提出者は本論文を英語で執筆しており、またその他多数の英語による論文発表や学会での発表を行っていることから、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： Modeling of Corona Discharge and Its Application to a Lightning Surge Analysis in a Power System

コロナ放電のモデリングと電力システムの雷サージ解析への応用

氏名： Tran Huu Thang

要旨：

When an overhead shield wire of transmission line is struck by lightning, corona discharge will occur on this wire. Corona discharge around a shield wire reduces its characteristic impedance, and increases the coupling between the shield wire and phase conductors. The reduced characteristic impedance of the shield wire results in a smaller tower current, and the increased coupling to the phase conductors increases phase-conductor voltages. As a result, corona discharge serves to reduce arcing-horn voltages. Also, it distorts the wavefronts of propagating lightning voltage surges. Thus, it is important to consider corona effects in computing lightning surges on transmission lines and in designing their lightning protection. A lightning surge propagating along a transmission line radiates transient electro-magnetic fields, which induce transient voltages on nearby conductors, such as telecommunication lines. Therefore, it is also significant to consider the effects of corona on overhead conductors from the view point of electromagnetic compatibility.

Several models accounting for corona discharge have been proposed for lightning surge computations using the electro-magnetic transients program (EMTP). Also, engineering models, which take into account physical characteristics of corona discharge, are found in literatures. However, no model has been proposed for electromagnetic computations using the finite-difference time-domain (FDTD) method, which has recently been used in surge computations.

In this thesis, a simplified model of corona discharge for the FDTD method is proposed for surge computations. The validity of this corona model is tested against experimental data and used for lightning surge simulations.

In chapter 2, fundamental concept and features of circuit-analysis methods and those of electromagnetic-computation methods are described. Then, the basic theory of the FDTD method for solving Maxwell's equations, which has been employed frequently in lightning surge simulations, and thin-wire-representing techniques for FDTD simulations are explained. Finally, representative applications of the FDTD method to surge simulations are reviewed.

In chapter 3, modeling of corona discharge on overhead wire for FDTD computations is explained. In the model, the progression of corona streamers from the wire is represented as the radial expansion of cylindrical conducting region around the wire. The validity of this corona model is tested against experimental data. Specifically, the waveform of radial current, and the relation between the total charge (charge deposited on the wire and emanated corona charge) and applied voltage ( $q$ - $V$  curve), computed using the FDTD method including the corona model for 22 m and 44 m long horizontal wires, are compared with the corresponding measured ones. Also, the computed increase of coupling between the energized wire and another wire nearby due to corona discharge is compared with the corresponding measured one. Further, the computed waveforms (including wavefront distortion and attenuation at later times) of fast-front surge voltages at different distances from the energized end of 1.4-km and 2.2-km long overhead wires are compared with the corresponding measured waveforms.

In chapter 4, the application of corona discharge model to lightning electromagnetic pulse computations is reviewed. Firstly, the simplified model of corona discharge for FDTD computations is applied to the analysis of transient voltages across insulators of a transmission line struck by lightning. In the simulation, three 60-m towers, separated by 200 m, with one overhead ground wire and three-phase conductors are employed. The progression of corona streamers from the ground wire is represented as the radial expansion of cylindrical conducting region around the wire. On the basis of the computed results, the effect of corona discharge at the ground wire on transient insulator voltages is examined. Secondly, the simplified model of corona discharge is applied to analysis of lightning-induced voltages at different points along a 5-mm radius, 1-km long single overhead wire taking into account corona space charge around the wire. Both perfectly conducting and lossy ground cases are considered. The magnitudes of FDTD-computed lightning induced voltages in the presence of corona discharge are compared with that reported by *Nucci et al.* and *Dragan et al.*. These results show that the proposed corona-discharge model is valid in lightning surge simulations with the FDTD method. Also, it is expected to be very useful in lightning surge protection design and study.

The conclusions summarizing to the research work presented in this thesis are given in chapter 5.