

博士学位論文審査要旨

2021年7月20日

論文題目： Lightning Surge Analysis of Transmission Lines Using Circuit Models
Considering Electromagnetic Phenomena

(電磁界現象を考慮した回路解析モデルによる送電線雷サージ解析)

学位申請者： 山中 章文

審査委員：

主査： 理工学研究科

教授 長岡 直人

副査： 一般財団法人電力中央研究所

山崎 健一

副査： 理工学研究科

教授 馬場 吉弘

要 旨：

送電線への雷撃は、瞬時電圧低下や停電、変圧器等電力機器の損傷を引き起こし、安定な電力供給を脅かす大きな要因となっている。したがって、雷撃による過電圧およびその発生頻度を正確に予測し、適切な対策を講ずることが求められる。

本論文は、まず被雷した鉄塔・送電線系の過渡特性を3次元電磁界伝搬の観点から明らかとしている。数値電磁界解析法に依ればこの特性を知ることができるが、膨大な計算機資源を要し、実用性の観点からは難がある。本論文は、非TEM伝搬で定まるこの過渡特性を、極めて高速に求める回路解析法で用いる等価回路モデルを開発している。

開発モデルの妥当性は、数値電磁界解析結果および過去に実鉄塔を用いて行われたサージ試験結果との比較により確認している。また、実系統で観測された逆フラッシュオーバ現象を開発モデルにより解析し、同現象を再現すると共に、送電線被雷時の商用電圧が逆フラッシュオーバに多大な影響を及ぼすことを明らかにし、提案解析法によりその発生様相を正確かつ高速に再現できることを明らかとしている。さらに、雷電流値と雷事故との関連を明らかとし、これまでの推定法によっては、事故率を過小評価する危険があることを示している。これに加え、雷事故率低減に係る送電用避雷装置の動作特性と効果的な配置法を検討している。

解析対象は、超高压送電系統からこれまで十分な検討がなされていなかった77kV特別高压系統に至っており、提案解析手法は極めて高い汎用性を有している。また、逆フラッシュオーバ、アレスタの動作は非線形特性を考慮する必要があるが、提案法はこれらの特性も巧みに処理することにより、極めて安定に処理し、実用性は高い。

本論文は、膨大な計算機資源を要する数値電磁界解析法に代わり、極めて高速で実用的かつ高精度な汎用送電線雷サージ数値回路解析法を提案した。この知見は、様々な条件での雷事故推定を可能とし、効果的な雷対策にも応用可能であることから、安定な電力供給に大きな貢献をする。

よって、本論文は、博士(工学)(同志社大学)の学位を授与するにふさわしいものであると認められる。

総合試験結果の要旨

2021年7月20日

論文題目： **Lightning Surge Analysis of Transmission Lines Using Circuit Models
Considering Electromagnetic Phenomena**

(電磁界現象を考慮した回路解析モデルによる送電線雷サージ解析)

学位申請者： 山中 章文

審査委員：

主査： 理工学研究科

教授 長岡 直人

副査： 一般財団法人電力中央研究所

山崎 健一

副査： 理工学研究科

教授 馬場 吉弘

要 旨：

本学位申請者は、2019年3月同志社大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士課程（前期課程）を修了し、同年4月から同専攻博士課程（後期課程）に進み現在在籍中である。

2021年7月3日15時00分より学術講演会が開かれ、およそ1時間半にわたり研究成果を講演した。その後、およそ30分の間、種々の質疑討論が行われ、提出者の説明により、十分な理解が得られた。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。

本論文の主たる内容は、IEEE Transactions on Power Delivery, Electric Power Systems Research, 電気学会論文誌 B および電気学会 Transactions on Electrical and Electronic Engineering に論文5件が掲載あるいは掲載決定となっており、十分な評価を受けている。これに加え、本論文と関連する電力系統サージ解析分野の論文をすでに5件発表しており、論文提出者の研究業績はすでに評価されている。口頭試問では、提出者が実践的な技術に加え、高度な専門的知識・十分な学力を有することが確認された。論文提出者は、国内学会のみならず、国際会議においても複数の論文発表をし、そのうちいくつかでは論文賞・発表賞等を受賞している。また、TOEICスコアは935点であり、後期課程進学時には語学資格試験は免除されている。

以上の点から、論文提出者は、高い研究能力に加え、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る。

博士學位論文要旨

論文題目 : Lightning Surge Analysis of Transmission Lines Using Circuit Models Considering Electromagnetic Phenomena

(電磁界現象を考慮した回路解析モデルによる送電線雷サージ解析)

氏名 : 山中 章文

要旨 :

A lightning strike to a transmission tower and resultant overvoltages are severe threats to the stable operation of electric power systems. The precise estimation of accidents and cost-effective countermeasures against lightning is indispensable. This thesis proposed a transmission tower and a line model to analyze lightning transients in the power systems. Back-flashover (BFO) analyses of transmission lines were performed using the presented models. The BFO characteristics were clarified, and also the efficiency of transmission line surge arresters (TLSAs) for reducing lightning accidents was analyzed.

The presented tower and line model can consider the non-transverse electromagnetic (non-TEM) characteristics of lightning-struck transmission towers and lines. When lightning strikes transmission tower top or overhead transmission line, the electromagnetic field spherically expands from the lightning-struck point. The TEM-mode, which is assumed in existing transmission tower and line models, cannot fully explain this initially dynamic non-TEM characteristic and resultant insulator voltages. This thesis revealed the non-TEM characteristics by the finite difference time domain (FDTD) analysis. The non-TEM characteristics of the lightning-struck tower and line include 1) gradually rising characteristics of the tower surge impedance with time, 2) gradually rising self and mutual surge impedance of transmission line with time and the time delays in mutual couplings corresponding to the separation distances, and 3) significant wave attenuation along the tower. The presented transmission tower and line model takes into account these characteristics. The insulator voltages computed by the presented model were thoroughly validated by referencing the FDTD-computed voltages and measured voltages at actual transmission towers reported in the past. Existing transmission tower and line models could have underestimated the insulator voltages.

Practical BFO analyses in high voltage (HV) and extra-high voltage (EHV) transmission lines were performed using the presented transmission tower and line models. The flashover (FO) model based on the leader progression method (LPM) was optimized for the HV transmission line. The generalized FO model and the TLSA model represented by the nonlinear resistance were utilized for the BFO analyses. The analyses revealed that the BFO characteristics depend on the power frequency voltages: in case the negative lightning strikes, the BFO occurs preliminary at phases with the positive power frequency voltages, while there is a possibility of BFOs at phases with the negative voltages. The analyses also identified the significant dependence of the minimum lightning current causing a lightning failure on the power frequency voltages, and the dependence clearly explained the BFO characteristics observed in an actual HV transmission line reported in the past. The reduction of the lightning fault rate by installing TLSAs was further analyzed for HV and EHV transmission lines. The optimum arrangement of TLSAs for any transmission line can be determined based on the presented models and the methodology.

The presented models can be implemented in any circuit simulator. The models and the analysis methodologies presented in this thesis provide a high-speed and accurate estimation of the lightning performance of transmission lines.