

Date of Submission (month day, year) : 1/6, 2025

Department of Electrical and Electronic Information Engineering	Student ID Number	D 205205	Supervisors	Yoshinobu Murakami(academic supervisor) Tomohiro Kawashima (co-supervisor)
Applicant's name	LI XIAOXIN			

Abstract (Doctor)

Title of Thesis	Calibration Method for Space Charge Measurement of Ultra-High Voltage Insulating Systems
-----------------	--

The construction of long-distance power grids connecting large-scale renewable energy sources with demand areas is gaining momentum in Europe and Asia, increasing the demand for ultra-high-voltage DC cables to carry the submarine portion of the lines. When DC voltage is applied to insulators for a long period of time, an internal charge is generated, which becomes a space charge and distorts the internal electric field, which should be uniform, leading to dielectric breakdown in the worst case. In quality assurance testing at the final stage of manufacturing and development, evaluation has been based mainly on the presence or absence of dielectric breakdown, since there was no technology to measure the space charge of thick insulators. The pulsed electro-acoustic method uses an external sensor to detect acoustic signals generated by the interaction of a pulsed electric field and space charge, but has been used only for the evaluation of basic physical properties of thin samples, mainly due to sensitivity issues. The purpose of this paper is to construct a measurement system and develop a calibration method for charge and electric field distribution to realize space charge measurement in full-scale ultra-high voltage insulation systems.

Chapter I describes the background and purpose of the study. Chapter II describes the construction of the measurement system using a polymer insulator with a thickness of about 10 mm or more, which is similar to an ultrahigh-voltage insulation system. The conventional metallic acoustic coupler was replaced with a polymer one to improve the acoustic matching, and the sensitivity was increased about 5 times. The space charge of an 88 mm polyethylene sample, the thickest in the world in this category, was successfully measured.

In Chapter III, we developed a method for calibrating the charge distribution and electric field distribution of practical insulating systems. In the past, a bias voltage was applied to a sample with no internal space charge, and the acoustic signal generated from the electrodes alone was used as a reference waveform for calibration. However, in many cases, it is impossible to obtain a reference waveform for practical insulating systems because space charge is already present due to the manufacturing process and charging history. Therefore, we proposed a method of applying a time variation to the bias voltage and extracting only the components correlated with the bias voltage from the response signal to obtain a reference waveform. In addition, since the space charge may follow the bias voltage as the sample temperature increases, we proposed a method to decompose the bias voltage and response signal variations into frequencies and correlate them using only the frequency components that the space charge cannot follow. These methods enable calibration at arbitrary times, even for samples with inherently mobile space charge.

In Chapter IV, we examined the effects of baseline and sensitivity fluctuations, which are problematic when actual measurements are made over long periods of time, and discussed how to compensate for these fluctuations. We have shown that the signal intensity is low in measurements of thick insulators and that calculation errors due to fluctuations in the waveform baseline and sensitivity become apparent and uncalibratable, and we have proposed a method to correct all measured acoustic signals so that the fundamental theorem of electrostatic fields holds true. This method is shown to be capable of displaying the electric field distribution with an accuracy of about

0.1 kV/mm, or 0.5% of the average electric field of practical ultrahigh-voltage insulation systems.

Chapter V describes the results of space charge measurements on a cable with an insulation thickness of 10 mm as a demonstration of the proposed method. It is shown that stable analysis results can be obtained by frequency-resolved analysis even when the space charge fluctuates.

In Chapter VI, as a result of this thesis, it is shown that accurate space charge measurement is now possible in any phase during quality assurance testing of full-scale extra-high voltage insulation systems, and application developments are discussed.

2025年1月6日

電気・電子情報工学専攻		学籍番号	第 205205 号	指導教員	村上 義信(主指導教委員) 川島 朋裕(副指導教員)
氏名	LI XIAOXIN				

論文内容の要旨（博士）

博士学位論文名	超高圧絶縁系の空間電荷測定のための校正法
---------	----------------------

（要旨 1,200 字程度）

<p>大規模再生エネルギー源と需要地を結ぶ長距離電力連系線の建設が欧亜で活発化しており，海底線部分を担う超高圧直流ケーブルの需要が増大している。絶縁体に長時間の直流電圧を印加すると内部帯電を生じ，空間電荷となって均一であるべき内部電界を変歪させ，最悪の場合絶縁破壊に至る。製造開発の最終段階で行う品質保証試験では，厚い絶縁体の空間電荷を測定する技術がなかったため，主として絶縁破壊の有無のみによる評価が行われてきた。パルス静電応力法は，パルス電界と空間電荷の相互作用で生じる音響信号を外部のセンサで検出するが，主に感度の問題から，薄い試料による基礎物性評価への利用に留まっていた。本論文は，実規模の超高圧絶縁系の空間電荷測定を実現するための測定系の構築と，電荷および電界分布の校正方法の開発を目的としている。</p> <p>第I章は研究背景および目的を述べている。第II章では，超高圧絶縁系に近い10 mm程度以上の厚さを有する高分子絶縁体を試料とした測定系の構築を述べている。従来の金属製音響結合器を高分子に変更して音響整合を改善し，約5倍の感度を得た。また，この範疇としては世界最厚となる88 mmポリエチレン試料の空間電荷測定に成功した。</p> <p>第III章では，実用絶縁系の電荷分布および電界分布の校正方法を開発している。従来は内部に空間電荷がない試料にバイアス電圧を印加し，電極のみから発生する音響信号を参照波形とした校正を行ってきたが，実用絶縁系では製造過程や課電履歴から，すでに空間電荷が内在し，参照波形の取得が不可能となることが多かった。そこで，バイアス電圧に時間変動を与え，応答信号の中からバイアス電圧と相関をもつ成分のみを抽出して参照波形を得る方法を提案した。加えて，試料温度が高くなるとバイアス電圧に追従して空間電荷が変動する可能性があるため，バイアス電圧と応答信号の変動を周波数分解して，空間電荷が追従できない程度の周波数成分のみを利用して相関させる方法を提案した。これらにより，移動しやすい空間電荷が内在する試料でも，任意の時刻に校正を実施できるようになった。</p> <p>第IV章では，実際に長時間に亘る測定を行ったときに問題となる基線と感度の揺らぎの影響を調べ，その補正方法について検討している。厚い絶縁体の測定では信号強度が低く，波形の基線と感度の揺らぎによる計算誤差が顕在化して校正不可能となることを示し，測定した全ての音響信号について，静電界の基礎定理が成立するように補正する方法を提案している。これにより，実用超高圧絶縁系の平均電界の0.5%にあたる0.1 kV/mm程度の精度で電界分布を表示できることを示した。</p> <p>第V章では，提案法の実証実験として，絶縁厚10 mmを有するケーブルの空間電荷測定を行った結果を述べている。空間電荷が変動する場合でも，周波数分解解析により安定した解析結果が得られることを示した。</p> <p>第VI章では，本論文の成果として，実規模超高圧絶縁系の品質保証試験中のどのような局面においても正確な空間電荷測定が可能となったことを述べ，応用展開について論じている。</p>
