

2025 年 1 月 6 日

電気・電子情報工学専攻		学籍番号	第 229201 号	指導教員	村上義信 川島朋裕
氏名	森田 翔亮				

論文内容の要旨 (博士)

博士学位論文名	実規模押出絶縁電力ケーブルの空間電荷測定技術の開発と絶縁特性評価への適用
---------	--------------------------------------

(要旨 1,200 字程度)

超高压直流送電は再生可能エネルギーの発電適地と電力需要地の偏在を解決する長距離電力輸送方法で、これを実現する押出絶縁ケーブルシステムは注目されている。押出絶縁ケーブルシステムでは、直流電界下における絶縁体の内部帯電(空間電荷)が絶縁性能低下の要因と指摘されている。先行研究では、実規模直流ケーブルの絶縁特性評価を目的に、パルス静電応力法を実規模ケーブルに適用して空間電荷を測定することで、絶縁体中の電界分布評価が試みられている。しかし、実規模ケーブルの厚い絶縁厚のため、十分な信号雑音比の波形を得ることが難しく、取得された波形を電荷および電界分布に変換する信号処理の確からしさを担保できないことを原因に、実規模ケーブルの電界分布全体の評価には至っていない。近年、我々は従来と比較して高い信号雑音比で波形を得られる新型測定センサを開発しており、これによって電界分布全体の取得および絶縁特性評価の蓋然性が高まっている。そのため、本論文では、新型測定センサを実規模ケーブルの空間電荷測定に適用し、取得波形を電界分布に変換する信号処理について検討し、測定で得られた電界分布を絶縁特性評価へ適用するための検討を行った。

第1章では、本研究の背景、目的および検討項目を示した。第2章では直流送電ケーブルシステム、第3章では固体高分子材料の電気伝導・絶縁破壊や空間電荷現象についてまとめた。

第4章では、新型測定センサの適用における便益や、様々な温度条件下(無負荷、高負荷、ロードサイクル条件)における信号処理手法の検討結果を述べ、信号処理の妥当性を検討した。その結果、ロードサイクル条件での信号処理では電界分布に5.5%程度の誤差が生じうることを示した。

第5章では、第4章で検討した信号処理手法を絶縁厚9 mmおよび23 mmの架橋ポリエチレン(XLPE)ケーブルの空間電荷の測定に適用し、それぞれの温度条件で電界分布が得られることを実証した。特に、ロードサイクル条件下における測定の検証は、我々が世界で初めての例である。

第6章では、第5章で得た絶縁厚9 mmケーブルの電界分布をもとに空間電荷蓄積機構を考察した。その結果、導電率の電界・温度依存性をだけでなく絶縁体中の架橋剤分解残渣分布を考慮することで、電界分布の推定結果の誤差を平均電界に対して9.5%から5.5%(導体温度90°C条件)に低減可能であることを示した。また、本測定によって得た電界分布を用いたケーブル絶縁体の導電率推定手法を検討し、シート状試料から得た導電率と概ね一致する結果を得た。加えて、文献情報をもとにケーブルの絶縁破壊メカニズムを整理し、ケーブル絶縁体の導電率を用いて逆極性インパルス絶縁破壊電圧および直流絶縁破壊電圧を計算可能であることを示した。これらを組み合わせて、空間電荷測定で得た電界分布から得た導電率を用いて絶縁破壊電圧を推定することで、ケーブルの絶縁特性を評価できる可能性を示した。

第7章には本論文の結論と今後の展望をまとめた。実規模ケーブルの空間電荷の測定結果を活用することで、ケーブルの絶縁特性を評価するモニタリングツールとしての活用が期待される。

Date of Submission (month day, year) :January 6th, 2025

Department of Electrical and Electronic Information Engineering	Student ID Number	D229201	Supervisors	Yoshinobu Murakami Tomohiro Kawashima
Applicant's name	Shosuke MORITA			

Abstract (Doctor)

Title of Thesis	Development of Space Charge Measurement System for Full-Scale Extruded Power Cables and its Application to Insulation Performance Evaluation
-----------------	--

Approx. 800 words

HVDC power transmission represents a promising solution for addressing the geographical imbalance between renewable energy generation sites and regions of power demand. HVDC extruded cable systems, which are renowned for their capacity to facilitate high-density power transmission, have attracted considerable interest. However, it has been reported that space charge phenomena within polymer insulation under DC electric fields contribute to a deterioration in insulation performance. Previous studies have sought to assess the distribution of electric fields within insulation by measuring the accumulation of space charge in full-scale cables using the pulse electro-acoustic (PEA) method. However, due to the thick nature of the insulation in full-scale XLPE cables, achieving a sufficient signal-to-noise ratio (SNR) has proven to be a challenge, hindering reliable conversion of acquired waveforms to charge and electric field distributions. In recent years, we have developed a new measurement sensor using the PEA method, which is capable of capturing waveforms with a higher SNR than conventional sensors, thereby increasing the plausibility for applying this measurement technique to the assessment of insulation performance. In this paper, we apply the new sensor to space charge measurements in full-scale cables and examine the signal processing required to convert the acquired waveforms into charge and electric field distributions. We also discuss the application of the obtained electric field distributions to the evaluation of insulation performance.

Chapter 1 provides an overview of the background, objectives and research focus of the study. Chapters 2 and 3 review the characteristics of HVDC power transmission cable systems and phenomena such as electrical conduction, insulation breakdown and space charge in solid polymer materials.

Chapter 4 discusses the advantages of using the new measurement sensor and the results of the signal processing methods considered under different temperature conditions (no load, high load and load-cycle conditions), evaluating the validity of these signal processing approaches.

In Chapter 5, the signal processing methods discussed in Chapter 4 were applied to space charge measurements in cross-linked polyethylene (XLPE) cables with insulation thicknesses of 9 mm and 23 mm. The resulting charge and electric field distributions under each temperature condition are presented. This study demonstrates, for the first time in the world, measurements under load-cycle conditions.

In Chapter 6, we analyzed the space charge accumulation mechanism based on the electric field distribution of the 9-mm-thick XLPE cable obtained in Chapter 5. As a result, we demonstrated that by considering not only the field and temperature dependence of conductivity but also the distribution of cross-linking byproducts within the insulation, the estimation error in the electric field distribution could be reduced from 9.5% to 5.5% relative to the average electric field under a conductor temperature condition of 90°C. Furthermore, we investigated a methodology for estimating the conductivity of cable insulation based on the electric field distribution obtained in space charge measurements. The results obtained were found to be generally consistent with the conductivity values derived from sheet-shaped samples. Moreover, a review of the literature was conducted to examine the insulation breakdown mechanism in cables. It was demonstrated that the superimposed impulse breakdown voltage and DC breakdown voltage could be calculated using the conductivity of the cable insulation. By combining these findings, it was shown that the potential exists to evaluate the insulation properties of cables by estimating the breakdown voltage using the conductivity derived from the electric field distributions obtained through space charge measurements.

Chapter 7 presents a summary of the conclusions of this paper and outlines prospects. It is anticipated that the utilization of the electric field distribution obtained from space charge measurements in full-scale cables could serve as a valuable monitoring tool for the evaluation of cable insulation performance.