

Abstract

The rapid evolution of modern electrical grids and increasing voltage levels require the use of high-performance insulators to ensure the reliability and safety of electricity transmission and distribution infrastructures. Among insulators, composite polymers have emerged as an alternative to glass and ceramic insulators due to their light weight, mechanical strength, and hydrophobic properties, as well as their superior performance in harsh environmental conditions. However, these insulators are subject to corona discharges, which can alter their dielectric and mechanical properties over the long term.

This thesis aims to understand the impact of corona discharges on high-voltage polymer insulators with advanced numerical modeling, validated by some experimental results. The objective is to identify aging mechanisms and propose effective mitigation strategies.

This work adopts an approach combining numerical simulations and experiments. A numerical model based on COMSOL Multiphysics® is developed to analyze the electric field distribution and the dynamics of space and surface charges in the presence of corona discharges. This model integrates space charge transport processes, ionization and electron attachment and detachment mechanisms, as well as interactions between the electric field and the insulator surface.

The simulations identified distinct discharge regimes depending on the electrical and environmental conditions. In particular, the study revealed that under positive corona, the appearance of streamers promotes faster discharge propagation and increased interaction with the polymer surface, accelerating material degradation. Under negative corona, the discharge is dominated by Trichel pulses, characterized by fast impulse currents and a local accumulation of negative charges that modify the electric field.

In parallel, an experimental approach was implemented to validate these observations. An experimental bench is designed to study corona discharges in positive and negative polarities. The use of an optical sensor allows for precise mapping of the electric field under various conditions, particularly under normalized lightning impulse voltage in point-plane geometry configuration.

The results obtained demonstrated excellent correlation between numerical simulations and experimental measurements, confirming the critical role of space charges in corona discharge dynamics. The integration of experimental and simulation data provides a deeper understanding of the interactions between the electric field and polymer insulators, paving the way for improvement strategies for their durability and reliability in power transmission and distribution networks.

The study also explored the influence of grading rings on electric field distribution. Simulations demonstrated that optimizing the position and dimensions of grading rings can significantly reduce corona discharge intensity and extend insulator lifetime. These results provide a basis for new design strategies aimed at improving the robustness of polymer insulators under severe conditions.

Outcomes of thesis provides a thorough understanding of the degradation mechanisms of polymer insulators subjected to corona discharges and proposes practical solutions to increase their reliability. The conclusions obtained are essential for the development of future more resistant insulators, thus reducing maintenance costs and improving the performance of high-voltage electrical infrastructures.

Résumé

L'évolution rapide des réseaux électriques modernes et l'augmentation des niveaux de tension nécessitent l'utilisation d'isolateurs de haute performance pour garantir la fiabilité et la sécurité des infrastructures de transmission et de distribution de l'électricité. Parmi les isolateurs, les polymères composites sont apparus comme une alternative aux isolateurs en verre et en céramique en raison de leur légèreté, de leur résistance mécanique et de leurs propriétés hydrophobes, ainsi que de leurs performances supérieures dans des conditions environnementales difficiles. Cependant, ces isolateurs sont soumis à des décharges corona, qui peuvent altérer leurs propriétés diélectriques et mécaniques à long terme.

Cette thèse vise à comprendre l'impact des décharges corona sur les isolateurs polymères haute tension à l'aide d'une modélisation numérique avancée, validée par quelques résultats expérimentaux. L'objectif est d'identifier les mécanismes de vieillissement et de proposer des stratégies d'atténuation efficaces.

Ce travail adopte une approche combinant simulations numériques et expériences. Un modèle numérique basé sur COMSOL Multiphysics® est développé pour analyser la distribution du champ électrique et la dynamique des charges d'espace et de surface en présence de décharges corona. Ce modèle intègre les processus de transport des charges d'espace, les mécanismes d'ionisation, d'attachement et de détachement des électrons, ainsi que les interactions entre le champ électrique et la surface de l'isolant.

Les simulations ont permis d'identifier des régimes de décharge distincts en fonction des conditions électriques et environnementales. En particulier, l'étude a révélé qu'en présence d'une décharge corona positive, l'apparition de streamers favorise une propagation plus rapide de la décharge et une interaction accrue avec la surface du polymère, ce qui accélère la dégradation du matériau. Sous la décharge corona négative, la décharge est dominée par les impulsions de Trichel, caractérisées par des courants d'impulsion rapides et une accumulation locale de charges négatives qui modifient le champ électrique.

En parallèle, une approche expérimentale a été mise en place pour valider ces observations. Un banc expérimental est conçu pour étudier les décharges corona en polarités positive et négative. L'utilisation d'un capteur optique permet de cartographier précisément le champ électrique dans différentes conditions, notamment sous tension normalisée d'impulsion de foudre dans une configuration de géométrie point-plan.

Les résultats obtenus ont démontré une excellente corrélation entre les simulations numériques et les mesures expérimentales, confirmant le rôle critique des charges d'espace dans la dynamique de la décharge corona. L'intégration des données expérimentales et de simulation permet de mieux comprendre les interactions entre le champ électrique et les isolateurs polymères, ce qui ouvre la voie à des stratégies d'amélioration de leur durabilité et de leur fiabilité dans les réseaux de transmission et de distribution d'énergie.

L'étude a également exploré l'influence des anneaux de garde sur la distribution du champ électrique. Les simulations ont démontré que l'optimisation de la position et des dimensions des anneaux de garde peut réduire de manière significative l'intensité de la décharge corona et prolonger la durée de vie de l'isolateur. Ces résultats fournissent une base pour de nouvelles stratégies de conception visant à améliorer la robustesse des isolateurs polymères dans des conditions sévères.

Les résultats de la thèse fournissent une compréhension approfondie des mécanismes de dégradation des isolateurs polymères soumis à des décharges corona et proposent des solutions pratiques pour augmenter leur fiabilité. Les conclusions obtenues sont essentielles pour le développement de futurs isolateurs plus résistants, réduisant ainsi les coûts de maintenance et améliorant la performance des infrastructures électriques à haute tension.