

金属化膜电容元件宽频特性研究

易承乾¹, 李超然¹, 张波¹, 贾华², 盖斌², 黄葵³, 邓光昭³, 吴云翼⁴, 李婉⁴

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077;
3. 嘉善赛晶电容有限公司, 浙江 嘉善 314100; 4. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 101199)

摘要: 金属化膜电容器被广泛使用在换流阀等电工装备中, 在电力电子开关快速动作的影响下, 电容器将承受高频冲击, 因此有必要研究宽频范围内电容器的特性。本文以单个电容元件为研究对象, 使用数字电桥对 20 Hz~2 MHz 范围内电容元件的阻抗特性进行了测量, 通过数据拟合和实验测量结合的方式建立了等效电路模型, 并对不同频率下的阻抗特性和等效电路参数进行了分析。研究表明: 在低频(<150 kHz)下, 参数恒定的等效电路模型可准确地描述电容元件的阻抗特性和内部物理过程; 而在高频(>150 kHz)下, 电容元件内部不同区域的电流分布将发生变化, 导致电容元件的等效电感和等效电阻等参数发生频变, 引起阻抗特性发生变化。本文结果可对分析高频冲击下电容器劣化机理提供指导。

关键词: 金属化膜电容器; 宽频特性; 等效电路; 频变参数

Study on Broadband Characterization of Metallized Film Capacitor Element

YI Chengqian¹, LI Chaoran¹, ZHANG Bo¹, JIA Hua², GAI Bin², HUANG Kui³,
DENG Guangzhao³, WU Yunyi⁴, LI Wan⁴

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 3. Jiashan Sun King Power Electronic Capacitor Co., Ltd., Zhejiang Jiashan 314100, China; 4. CTG Science and Technology Research Institute, Beijing 101199, China)

Abstract: Metallized film capacitor is widely used in such electrical equipment as converter valves and, under the influence of rapid operation of power electronic switches, will be subjected to high-frequency shocks, it is therefore necessary to study the characteristics of the capacitor in a wide frequency range. In this paper, the single capacitor elements is taken as the study object. The impedance characteristics of capacitor elements in the range of 20 Hz~2 MHz are measured by using a digital bridge. An equivalent circuit model is set up by a combination of data fitting and experimental measurements and the impedance characteristics and equivalent circuit parameters at different frequencies are analyzed. The study results show that at low frequencies (<150 kHz), the equivalent circuit model with constant parameters can accurately describe the impedance characteristics and internal physical processes of the capacitor element, while at high frequencies (>150 kHz), the current distribution in different areas inside the capacitor element will change, resulting in a frequency change of such parameters as equivalent inductance and equivalent resistance of the element, which causes a change in the impedance characteristics. The results of this paper can provide guidance for analyzing the degradation mechanism of capacitor under high-frequency shocks.

Keywords: metallized film capacitors; broadband characteristics; equivalent circuit; frequency-variable parameters

0 引言

作为高压直流输电工程的“心脏”,换流阀长期受到学者和业界的关注。大容量金属化膜电容器由于具有重量轻、结构紧凑、可自愈等优点^[1-2],被广泛使用在换流阀中^[3-4]。作为换流阀中最重要的组成部件之一,电容器故障率在整个换流阀中仅次于电力电子开关^[5]。因此,金属化膜电容器的稳定性直接影响到整个换流阀乃至电力系统的稳定性,需要重点关注^[6-7]。

在换流阀中,电力电子开关的动作快速且频繁。以模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)为例,大容量金属化膜电容器在换流阀中起到支撑电压和平衡瞬时功率的作用。在开关动作的瞬间,电容器上的电流在0和数百安培之间迅速变化,此切换过程往往在数微秒内完成^[8-9]。导致电容器在开关切换的过程中将承受快速变化电流(即高频电流)的冲击^[10]。因此,需要关注电容器在宽频范围的特性。

当前,研究人员主要使用数字电桥等设备来测量电容器在不同频率下的阻抗特性^[11-12]。但是此方法仅能获得电容器的整体特性,无法对电容器内部的物理过程进行分析。有学者对低电压小容量电容器采用数据拟合的方法,建立了集总宽频等效电路描述电容器内部参数^[13]。但由于研究的电容器较小,在其研究的频率范围内,内部电流等物理量分布均匀且保持不变,因此参数恒定的等效电路模型无法反映更普遍的情况。有学者简化电容器结构,使用解析求解或建立分布式等效电路的方法,研究了电容器在高频下的电流分布,发现在高频下电容器内部电流分布不均^[14-17]。然而此类方法的建模和求解比较复杂,且需要对电容器进行较多的简化和假设。

本文以实际应用于换流阀的直流支撑电容器中的单个电容元件为研究对象,使用数字电桥对其在20 Hz~2 MHz范围内的阻抗特性进行了测量,获得了宽频范围内电阻和电抗的变化规律。通过数据拟合的方法,建立了低频范围内参数恒定的等效电路模型。结合实测的高频下的薄膜参数,获得了高频范围电容器内部等效串联电感和电阻参数随频率变化的规律。

1 测量回路与方法

本文的实验对象为实际换流阀用大容量金属化膜电容器中的一个电容元件,其内部结构如图1所示。蒸镀完金属层的双向拉伸聚丙烯被卷绕在一

根绝缘轴上,两个端面喷有金属用于电气连接^[18]。为保证其高电压耐受能力,本文所使用的电容元件内部为串联结构。电容元件的高度为10 cm,绝缘轴直径为9 mm,整个元件的直径为76 mm。

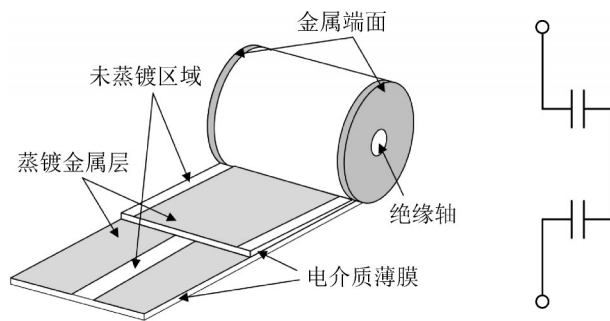


图1 电容器元件内部结构示意图
Fig. 1 Internal structural schematic diagram of capacitor element

本文使用数字电桥(Agilent, E4980A)对电容元件的阻抗特性进行测量,测量范围为20 Hz~2 MHz。通过按电容器尺寸固定测量回路、开路/短路校准等手段,消除高频测量过程测量回路带来的误差;将测量回路放入带屏蔽的烘箱内消除外界环境的干扰。

2 实验结果分析

2.1 阻抗特性

电容元件的阻抗可表示为 $Z=R+jX$ 。阻抗大小 $|Z|=\sqrt{R^2+X^2}$ 与相位随频率变化的情况如图2所示。由图2可知电容元件在150 kHz左右发生谐振。在频率低于150 kHz时,电容起主要作用,元件呈现容性,且随频率增加,阻抗值越来越小;当频率超过150 kHz时,电感起主要作用,元件呈现感性,且随频率增加,阻抗值越来越大。

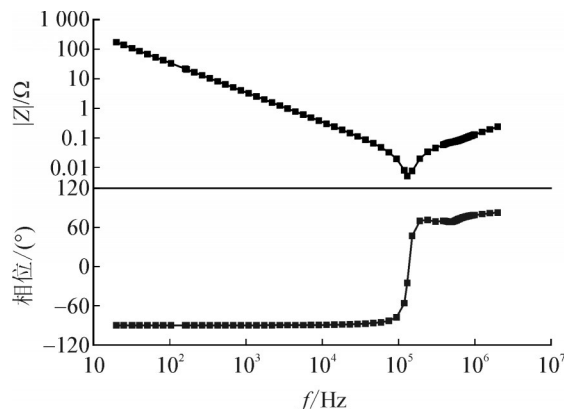


图2 电容元件阻抗特性
Fig. 2 Impedance characteristics of capacitor element

电阻 R 和电抗大小 $|X|$ 随频率变化的情况如

图 3 和图 4 所示。在低频率范围,随频率增加,电阻逐渐减小并保持稳定,电抗逐渐减小,直至发生谐振;当频率高于谐振频率时,电阻 R 和电抗大小 $|X|$ 均随频率增加而增加。在频率大于 400 kHz 时电阻存在突然下降再缓慢增加的趋势,这可能是由内部结构导致的二次谐振^[11]。

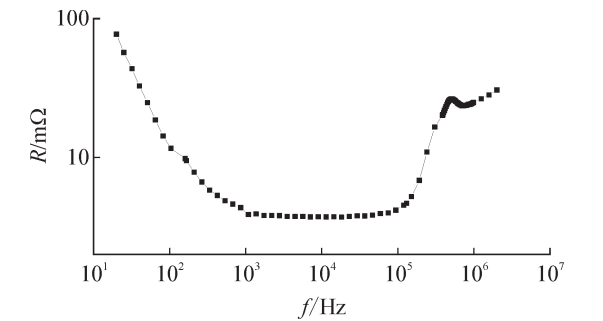


图3 电阻 R 随频率变化趋势
Fig. 3 Variation trend of resistance R with frequency

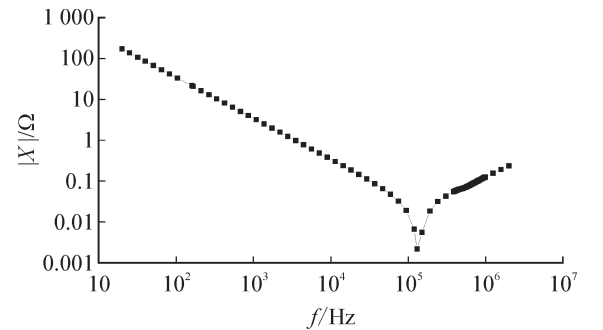


图4 电抗 $|X|$ 随频率变化趋势
Fig. 4 Variation trend of reactance $|X|$ with frequency

2.2 低频段

由电容元件内部电流路径分析可知:电流通过引线和端部金属端面流入,然后经过蒸镀金属层穿过聚丙烯薄膜,最后经蒸镀金属层和金属端面流出电容元件。因此可将电容元件等效为如图 5 所示的等效电路图^[13]。其中: R_1 表示接触电阻和金属部分的电阻; L 表示由引线和卷绕结构等引起的电感; R_4 表示由趋肤效应导致的电阻; C_1 代表电容薄膜中的无损极化; R_2 是代表电容薄膜泄露电流的电阻; C_2 表示有损极化; R_3 表示极化损耗。

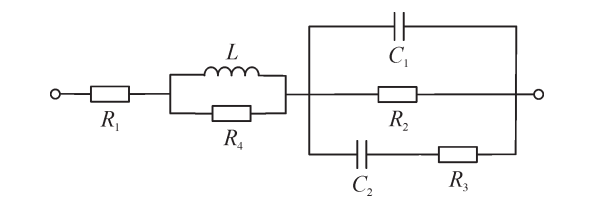


图5 电容元件等效电路图
Fig. 5 Equivalent circuit diagram of capacitor element

基于此等效电路模型可得到整个电容元件电阻 R 和电抗 X 的表达式为

$$R = \frac{R_2 + \omega^2 R_2 R_3 C_2 (R_2 C_2 + R_3 C_2)}{(1 - \omega^2 R_2 R_3 C_1 C_2)^2 + \omega^2 (R_2 C_2 + R_3 C_2 + R_2 C_1)^2} + \frac{\omega^2 R_4 L^2}{R_4^2 + \omega^2 L^2} + R_1$$
$$X = - \frac{\omega^3 R_2^2 R_3^2 C_1 C_2^2 + \omega R_2^2 (C_1 + C_2)}{(1 - \omega^2 R_2 R_3 C_1 C_2)^2 + \omega^2 (R_2 C_2 + R_3 C_2 + R_2 C_1)^2} + \frac{\omega R_4^2 L}{R_4^2 + \omega^2 L^2}$$

式中, ω 为角频率。
本文采用数据拟合的方法,对测量得到的电容元件阻抗数据进行拟合。在 150 kHz 以下,拟合结果的拟合优度 $R^2=0.999\ 1$ 。拟合得到的等效电路中各参数的值如表 1 所示。由表 1 中结果可知,电容元件中无损极化占主导($C_1>C_2$),电感大约在 28.61 nH,聚丙烯薄膜的绝缘能力很好(R_2)。

表1 拟合得到的等效电路中各参数值
Table 1 Each parameter in the equivalent circuit obtained by the fitting

参数	数值
C_1/F	4.608×10^{-5}
C_2/F	3.805×10^{-8}
L/H	2.861×10^{-8}
R_1/Ω	0.003 8
R_2/Ω	4.999×10^{11}
R_3/Ω	1.936×10^5
R_4/Ω	1

测量的电阻和电抗数据以及拟合的曲线如图 6 和图 7 所示。由曲线和测量数据可看出,当频率低于 150 kHz 时,使用表 1 中的参数值和图 5 所示的电路拓扑,可对电容元件进行较好的描述。但是,当频率超过 150 kHz 时,使用拟合曲线得到的值与测量值有较大偏差。这是因为在高频下电容元件内部电磁耦合作用强烈,内部的电流分布将发生变化^[14],基于低频下的结果得到的等效电路拓扑和拟合的参数值将不再适用。

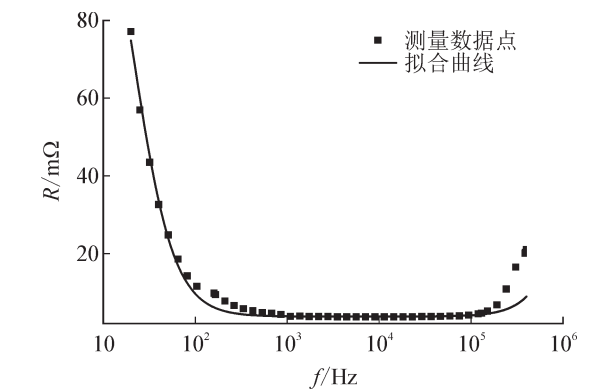


图6 电阻数据的拟合结果
Fig. 6 Fitting results for resistance data

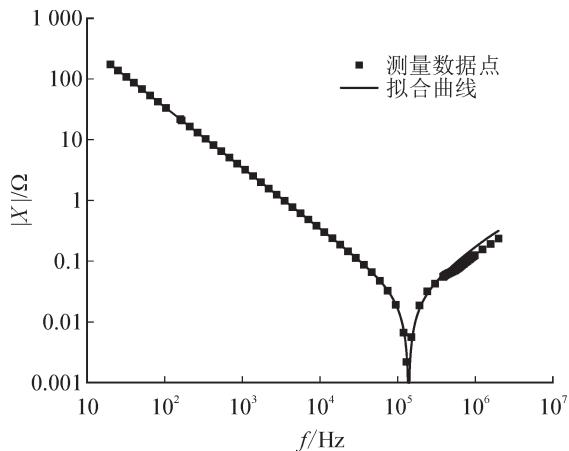


图7 电抗数据的拟合结果
Fig. 7 Fitting results for reactance data

2.3 高频段

电容元件中的电阻、电感和电容均会受到频率的影响。电容值主要受聚丙烯薄膜材料本身介电常数的影响。使用宽频介电谱仪测量纯聚丙烯薄膜宽频范围的相对介电常数 ϵ_r 和介质损耗角正切 $\tan\delta$, 结果如图8所示。由图8中结果可知:随着频率的增加,聚丙烯薄膜的相对介电常数略微减小,而介质损耗角增大。

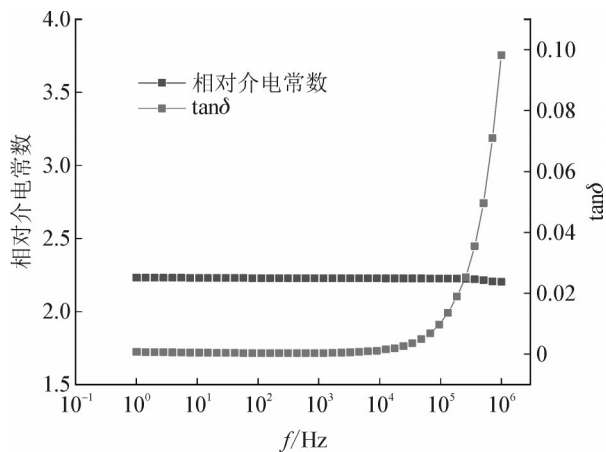


图8 宽频范围聚丙烯薄膜的相对介电常数与损耗变化情况
Fig. 8 Variation of relative dielectric constant and loss in polypropylene films over a wide frequency range

由于电容薄膜部分的参数可通过仪器测量得到,因此可将电容薄膜部分简化等效为电容 C_c 和电阻 R_c 串联表示,如图9中所示。各频率下具体的电容值和电阻值通过测量数据转化得到。

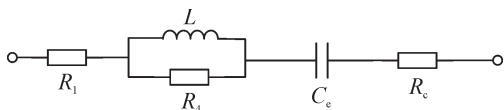


图9 简化的等效电路模型
Fig. 9 Simplified equivalent circuit model

在已知简化等效电路模型内部 R_1 、 C_c 和 R_c 的条

件下,结合测量得到的阻抗数据,可通过求解方程(3)和方程(4)得到各频率下 L 和 R_4 公式为

$$R(\omega) = R_1 + \frac{\omega^2 L^2(\omega) R_4(\omega)}{R_4^2(\omega) + \omega^2 L^2(\omega)} + R_c(\omega) \quad (3)$$

$$X(\omega) = \frac{\omega L(\omega) R_4^2(\omega)}{R_4^2(\omega) + \omega^2 L^2(\omega)} - \frac{1}{\omega C_c(\omega)} \quad (4)$$

高频下 L 和 R_4 随频率变化的结果如图10所示。由图10中结果可知:在高频下,电阻和电感参数不再保持恒定。随着频率的增加,表征趋肤效应的电阻 R_4 总体先减小后增加,电容元件内部电流分布发生明显变化,出现类似趋肤效应的现象,导致电感值 L 减小。在频率大于 400 kHz 时, R_4 值有一个先减小后迅速增大的趋势,这与电容器内部具体的电流分布有关。

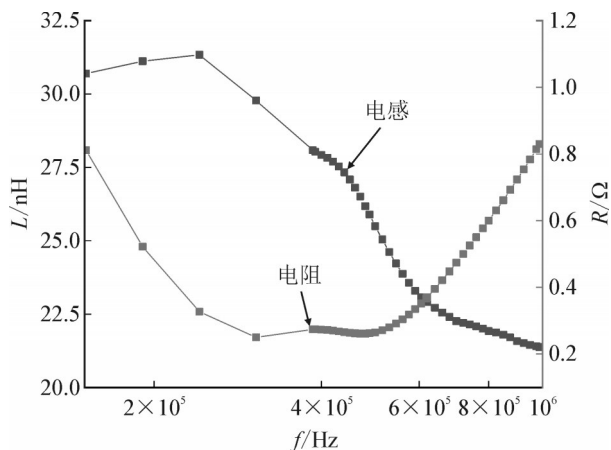


图10 高频下等效电感 L 和电阻 R_4 的变化情况
Fig. 10 Variation of equivalent inductance L and resistance R_4 at high frequencies

3 结语

本文研究了单个电容元件在 20 Hz~2 MHz 范围内的特性,得出如下结论:

1) 电容元件在 150 kHz 左右发生谐振。在低频率范围:随频率增加,电阻逐渐减小并保持稳定,电抗绝对值逐渐减小,直至发生谐振;在高频范围:电阻和电抗均随频率增加而增加。在频率大于 400 kHz 时电阻存在突然下降再缓慢增加的趋势,这可能是由内部二次谐振导致的结果;

2) 在低频范围(<150 kHz),通过对测量数据进行拟合,建立了参数恒定的宽频等效电路模型;该模型可准确地描述电容元件在低频下的特性和内部物理过程;

3) 在高频范围(>150 kHz),参数将发生频变。结合宽频范围聚丙烯薄膜介电常数和损耗的测量结果、电容元件的阻抗特性数据,求解发现随着频

率的增加,电感值逐渐减小。表明电容元件会出现类似趋肤效应的现象,内部电流分布发生变化。

基于本文研究得到的高频下电感和电阻的结果,可尝试反演得到内部具体的电流分布,这是后续研究的目标。

参考文献

- [1] SANDSTRÖM G Ö, TINGSTRÖM J. Management of radical innovation and environmental challenges: development of the dry capacitor at ABB[J]. *European Journal of Innovation Management*, 2008, 11(2): 182-198.
- [2] TINGSTRÖM J, SWANSTRÖM L, KARLSSON R. Sustainability management in product development project—the ABB experience[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2006, 14(15/16): 1377-1385.
- [3] WANG Huai, LISERRE M, BLAABJERG F. Toward reliable power electronics: challenges, design tools, and opportunities[J]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2013, 7(2): 17-26.
- [4] KOLAR J W, ROUND S D. Analytical calculation of the RMS current stress on the DC-link capacitor of voltage PWM converter systems[J]. *IEEE Proceedings Electric Power Applications*, 2006, 153(4): 535-543.
- [5] YAO Ran, LI Hui, LAI Wei, et al. Lifetime analysis of metallized polypropylene capacitors in modular multilevel converter based on finite element method[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(4): 4248-4259.
- [6] TANG Yuan, RAN Li, ALATISE O, et al. A model assisted testing scheme for modular multilevel converter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(1): 165-176.
- [7] PAN Wei, SU Junni, ZHONG Qihao, et al. Reliable application of metallized film capacitor for flexible HVDC valve [C]//2022 IEEE 5th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE). [S. l.]: IEEE, 2022: 244-249.
- [8] REN Chunpin, LIU Jiapeng, WU Jinpeng, et al. Deciphering the effect of corrugated P-base on reverse blocking IGCT[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(9): 5059-5067.
- [9] YAN Xin, YU Zhanqing, QU Lu, et al. A novel oscillating-commutation solid-state DC breaker based on compound IGCTs[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(2): 1418-1422.
- [10] YAO Ran, LI Hui, LAI Wei, et al. Lifetime analysis of metallized polypropylene capacitors in modular multilevel converter based on finite element method[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(4): 4248-4259.
- [11] EL-HUSSEINI M H, VENET P, AL-MAJID A, et al. Manufacturing technology effect on current pulse handling performance of metallized polypropylene film capacitors[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2007, 36(18): 2295-2303.
- [12] HE Yushuang, WANG Feipeng, PAN Jianyu, et al. Effect of temperature on dielectric properties of metallized film capacitor[C]//2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). [S. l.]: IEEE, 2021: 1-4.
- [13] MAKDESSI M, SARI A, VENET P. Modeling of metallized polymer films capacitor's impedance[C]//IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. [S. l.]: IEEE, 2012: 4048-4053.
- [14] JOUBERT C, BEROUAL A, ROJAT G. Magnetic field and current distribution in metallized capacitors[J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 76(9): 5288-5293.
- [15] SIAMI S, JOUBERT C, GLAIZE C. High frequency model for power electronics capacitors[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2001, 16(2): 157-166.
- [16] JOUBERT C. Asymmetrical current distribution in metallized film capacitors[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 95(11): 6420-6425.
- [17] BROWN R W. Distributed circuit modeling of multilayer capacitor parameters related to the metal film layer[J]. *IEEE Transactions on Components & Packaging Technologies*, 2007, 30(4): 764-773.
- [18] SARJEANT W. Capacitors[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1990, 25(5): 861-922.

作者简介:

易承乾(1996—),男,博士,主要从事高电压与绝缘、多物理场仿真等技术研究。E-mail: chq_yi@163.com。

李超然(2001—),男,博士,主要从事高电压与绝缘、电缆故障定位等技术研究。

张波(1976—),男,教授,主要从事高电压工程数值计算、智能电网电磁环境和电磁兼容、输变电装备智能检测和数字孪生技术研究。

贾华(1975—),男,正高级工程师,主要从事电容器的设计、工艺、试验研究和行业管理工作。

盖斌(1988—),男,高级工程师,主要从事电力电容器及成套装置的检测和试验研究。

黄葵(1969—),女,高级工程师,长期从事电力电容器、电力电子电容器的研发及制造工作。

邓光昭(1987—),男,工程师,长期从事电力电容器、电力电子电容器的研发及制造工作。

吴云翼(1980—),男,教授级高级工程师,主要研究方向为储能系统与控制。

李婉(1985—),女,工程师,主要研究方向知识产权法、储能系统。