

基于局部放电量的环氧树脂脉冲电应力老化特性研究

程泉栋¹, 李永军², 李小虎², 张世豪¹, 王俊浩¹, 张炜宽¹

(1. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450045; 2. 中建七局安装工程有限公司, 河南 郑州 450045)

摘要: 针对 GIS 内出现的冲击型电应力老化现象, 设计一套特斯拉脉冲电源发生器, 通过控制调节脉冲电压的输出幅值及频率, 研究纳米 Al_2O_3 填料与环氧树脂共混填充在不同电压幅值、频率试验条件下的绝缘特性和局部放电量的变化规律。结果表明, 较高的脉冲幅值与脉冲频率会加快空间电荷的入射与脱陷过程, 加剧复合材料内部局部放电过程, 促进导电通道分支的发展, 进而使复合材料的老化程度更加严重。该研究结果有利于提升电气设备缺陷发现能力, 减小故障几率, 缩短停电检修时间, 为设备异常故障分析提供参考依据。

关键字: 环氧树脂; 脉冲电压; 纳米 Al_2O_3 ; 局部放电量

Study on pulsed electrical stress aging characteristics of epoxy resin based on partial discharge

CHENG Quandong¹, LI Yongjun², LI Xiaohu², ZHANG Shihao¹, WANG Junhao¹, ZHANG Weikuan¹

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2. Installation Engineering Co., Ltd. of CSCEC 7th Division, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: A set of Tesla pulse power generators is designed to deal with the impact of electrical stress aging in GIS. By controlling the output amplitude and frequency of the pulse voltage, the nano- Al_2O_3 filler and epoxy resin are mixed and filled at different voltages. Variations of insulation characteristics and partial discharges are studied under amplitude and frequency test conditions. The results show that higher pulse amplitude and pulse frequency will accelerate the process of space charge incidence and de-collapse, intensify the partial discharge process inside the composite material, promote the development of conductive channel branches, and then make the composite material more aging. The results of this study are conducive to improving the ability to detect defects in electrical equipment, reducing the probability of failure, reducing the time for power failure and maintenance, and providing a reference for the analysis of abnormal failures of equipment.

Key words: epoxy resin; pulse voltage; nano Al_2O_3 ; partial discharge

0 引言

环氧树脂是固体绝缘高压金属封闭开关设备 (GIS) 的主要绝缘材料^[1], 物理化学性能优良, 在金属与非金属表面都具有较好的粘接性

能, 固化后具有硬度大且不易收缩变形的特点, 在 GIS 内部起到绝缘和支撑的关键作用^[2-4]。2008 年底—2018 年底, 第一批特高压变电站已投运逾 10 年, 我国已占据特高压交流开关制造的制

高点,但是特快速暂态过电压(VFTO)^[5-7]会在GIS内环氧树脂内部产生极不均匀电场,引起环氧内部电场畸变,在缺陷部位首先激发局部放电,引起电树老化并不断发展,产生永久性绝缘劣化,最终导致电树击穿。特快速暂态过电压是由于开关在开断过程中触头间发生多次重燃和预击穿现象并形成上升沿很短的冲击波,该冲击波在传播过程中经过多次反射与折射,相互叠加,最后形成上升沿很陡、频率很高的振荡冲击波。近五年由于GIS内部局部放电异常引起330 kV及以上组合电器击穿放电占比已达70%,因此研究环氧浇注绝缘材料在不同电压幅值、频率试验条件下的绝缘特性和局部放电量的变化规律,有利于提升电气设备缺陷发现能力,减小故障几率,缩短停电检修时间,为设备异常故障分析提供参考依据。

目前国内外学者针对环氧浇注绝缘材料在微秒脉冲下的沿面闪络现象研究较多,但是对微秒脉冲下绝缘材料内部永久性绝缘劣化问题仍然缺乏相应研究。文献[13]采用指型电极对绝缘材料表面施加连续的微秒脉冲电压并控制放电老化时间进行电老化试验,对放电老化前后绝缘材料表面形貌进行表征,试验得出沿面闪络电压随微秒脉冲放电时间变化趋势。文献[14]针对GIS所用环氧浇注绝缘材料在高频脉冲电压下的绝缘劣化现象,开展了SF₆环境下的纳秒脉冲沿面闪络试验,结果表明,环氧浇注绝缘材料表面纳秒脉冲闪络电压变化趋势与充入SF₆气体压强呈正相关。文献[15]对不同温度、电压下电树枝生长特性开展了一系列研究,结果表明,高温对电树枝的发展具有促进作用;单一的施加直流电压不易引发电树老化,脉冲电压下电树生长速度与脉冲幅值、脉冲频率呈正相关。文献[16]等人研究了不同环境温度下环氧树脂的电树生长特性,结果表明提高温度对电树生长具有正向促进作用,并且在温度达到玻璃化转变温度时,电树枝的生长特性会出现显著变化。

本文针对GIS内出现的冲击型电应力老化现象,设计一套特斯拉脉冲电源发生器,通过控制

调节脉冲电压的输出幅值及频率,研究纳米填料与环氧树脂共混填充在不同试验条件下的起始放电电压及局部放电量的变化特性,为环氧树脂复合材料在长时间脉冲电应力工作条件下的异常故障分析提供参考依据。

1 试验部分

1.1 试样制备

1.1.1 试验材料

CY 5824 CI (CH) 双酚A环氧树脂 (EP) (广州亨斯迈)、HY 5824 CI (CH) (固化剂,广州亨斯迈)、硅烷偶联剂KH550 (南京创世化工助剂有限公司)、纯度99.99%、粒径40 nm的纳米 α -Al₂O₃ (南京明昌新材料科技有限公司)、脱模剂GA-7500 (大金化学国际贸易有限公司)。

1.1.2 制备流程

纳米粒子掺杂含量如表1所示。

表1 纳米粒子掺杂含量
Tab. 1 Nanoparticle doping content

serial number	EP	固化剂	Al ₂ O ₃
contents/g	25	20	1.35

试样制备流程如下:

- 1) 加入环氧树脂60 ℃下磁力搅拌10 min, 去除环氧树脂内多余水分及气泡。
- 2) 加入固化剂及接枝处理后的纳米Al₂O₃在40 ℃下磁力搅拌30 min。
- 3) 40 ℃下超声分散30 min, 使纳米粒子在环氧基体内达到均匀分散。
- 4) 60 ℃下真空抽气20 min, 除去搅拌过程中混入环氧基体内的空气, 减小固化过程中产生气隙类缺陷的概率。
- 5) 模具80 ℃下预热并均匀喷涂脱模剂, 按照80~120 ℃ 2 h的固化曲线进行固化后脱模。

1.1.3 试样预处理

将制备出的环氧树脂复合试样使用酒精均匀擦拭后放入超声分散机内处理20 min, 然后放入烘箱内80 ℃干燥2 h备用。

1.2 试验仪器

1.2.1 特斯拉脉冲电源

本试验基于实验室自制的特斯拉重频脉冲发生器，如图1所示，频率可调范围为0~1 000 Hz，上升沿为30 ns，可输出电压范围为0~20 kV。

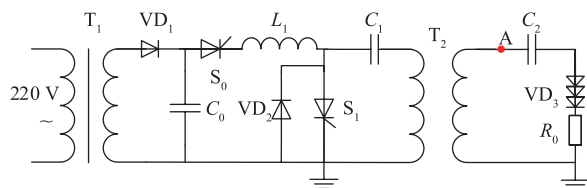


图1 脉冲电源示意图

Fig. 1 Pulse power supply schematic

图1中，A点为脉冲电压高压输出端，与试验用针板电极平台的针电极相连，如图2所示。使用的针板电极相当于在环氧试样表面激发极不均匀电场，使材料内部产生局部放电加速老化过程。

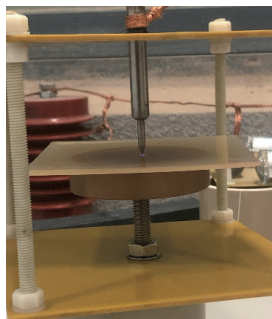


图2 针板电极平台

Fig. 2 Needle plate electrode platform

试验时电压分别设置为10 kV、12 kV和14 kV，频率分别设置为100 Hz、300 Hz和500 Hz，老化时间分别为10 min、20 min和30 min，每种条件下均使用5个试样进行试验，最后取平均值作为试验结果，共需样板 $3 \times 3 \times 3 \times 5 = 135$ 个。

1.2.2 局部放电测试

绝缘材料的绝缘击穿通常是从材料内部局部缺陷处的放电开始，而当绝缘材料长期处于极不均匀电场时，会在局部放电的作用下产生永久性绝缘劣化，因此针对固体绝缘材料的绝缘缺陷检测，局部放电强度检测是一种能直观反映材料劣化程度的重要方法之一。

本文采用KJF-2020局放仪对老化过程中环氧试件的局部放电强度进行检测，试验电路如图3所示。图3中， Z_{ch} 为阻塞阻抗； C_k 为耦合电容； Z_d 为检测阻抗；M为局放仪。采用脉冲电流法检测高压试品的局部放电量，由控制台控制调压器和变压器在试品的高压端产生测试局部放电所需的预加电压和测试电压，通过无局放耦合电容器和检测阻抗将局部放电信号取出，并送至局放仪显示并判断和测量。

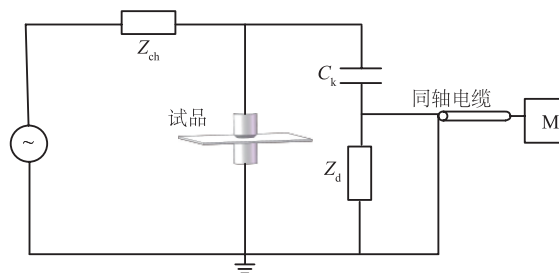


图3 局部放电测量回路

Fig. 3 Partial discharge measurement circuit

连续升高电压，注意第一次出现的持续放电，当放电量超过规定的最低值电压时，即为局部放电起始电压。本试验选取10个试样测得初始局部放电起始电压均值为11.7 kV，因此为表征脉冲老化过程中试样局部放电变化趋势，局部放电测试电压设定为12 kV，测试时以2 min内重复出现的局部放电最大值作为试样在该测试条件下的局部放电量。

2 试验结果分析与讨论

2.1 脉冲频率对局部放电量的影响

局部放电量的变化能够反映出绝缘材料内部缺陷发展的严重程度，因此在相同试验条件下，随着试验时间的增加，环氧材料内部累积不可逆，绝缘损伤持续增加，导致局部放电量均呈指数型增长。

对于同一种固体绝缘材料，施加相同幅值的脉冲电压，不同幅值的脉冲频率局部放电量与脉冲频率的关系为正相关，如图4所示。这是因为脉冲电压放电次数与脉冲频率满足正比关系，因此与低频相比，较高的脉冲频率会产生更多的空

间电荷,加剧材料内部局部放电过程,并且电荷在极不均匀电场的交替作用下也会不断地发生电荷入射与电荷脱陷,提高环氧分子链与空间电荷碰撞几率,当电荷脱陷所需时间小于环氧树脂分子自身的松弛时间时,环氧分子将需要承受由于电荷脱陷而产生的机械应力,并且环氧分子链可能在该机械应力的作用下瞬间断裂,在持续的反复作用下,将导致针电极附近有更多的环氧分子

断裂。同时由于高频下电荷的脱陷与入射过程都是极为迅速的,当大量空间电荷从环氧内部沿着表面由于分子链大量断裂而绝缘较为薄弱的区域向电极涌入时,将产生大量的热量,导致小分子物质碳化沉积,形成更宽的放电通道,进一步加剧绝缘劣化过程,从而在相同测试电压下具有更高的放电电荷量。

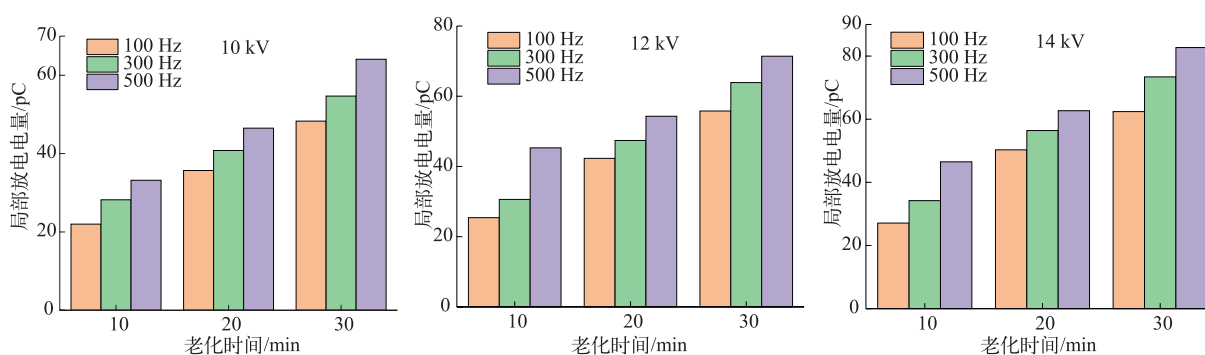


图4 不同脉冲频率老化过程中局部放电量变化趋势

Fig. 4 Changes trend of partial discharge during aging with different pulse frequencies

2.2 脉冲幅值对局部放电量的影响

图5表明随着施加脉冲电压幅值的增大,局部放电量也明显增大,同时也表明提高脉冲幅值对绝缘材料的劣化过程具有正向促进作用。与低脉冲幅值相比,高的脉冲幅值会使局部放电量的数量与放电强度都大幅增加,进而使注入放电通道的电荷量增多,同时注入环氧内部的空间电荷也具有更大的势能,使原本在施加低压脉冲时困

在深陷阱里由于跳跃势垒过高而无法脱陷的电子得以成功脱陷并迁移,加快了环氧树脂复合材料内空间电荷的脱陷速率,促进了空间电荷与环氧分子的碰撞过程,并产生更多的小分子物质,然后由于高场强下材料介质损耗的作用会释放大热量,导致小分子物质碳化降解,形成更长的放电通道,这就意味着绝缘劣化更加严重,因此在相同测试电压下局部放电量显著增大。

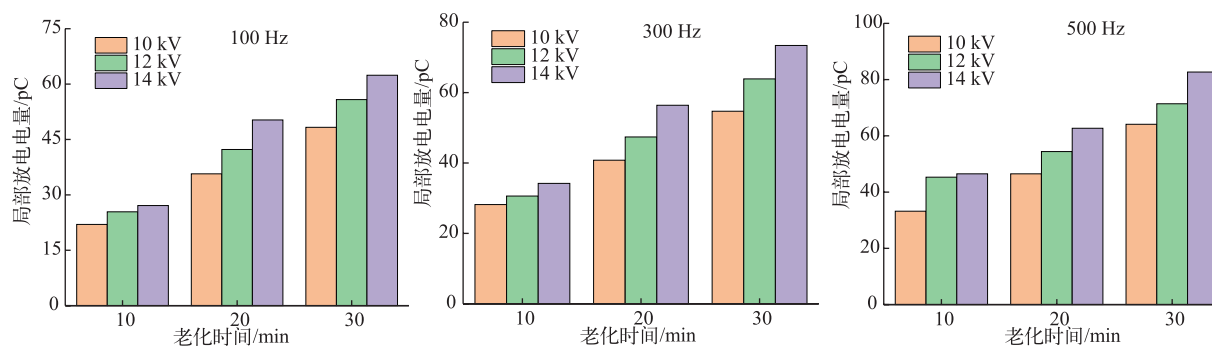


图5 不同脉冲幅值老化过程中局部放电量变化趋势

Fig. 5 Changes trend of partial discharge during aging with different pulse amplitudes

2.3 脉冲频率对局放起始电压的影响

图6所示柱状图表明,在同一脉冲电压和频率下,环氧浇注绝缘试件局部放电起始电压均随老化时间呈下降趋势。这是因为在脉冲电压应力的冲击下,材料内微观结构逐渐破坏,大分子链累积断裂并在局部高温作用下发生碳化,随着老化进程的持续,材料累积损伤加剧,在较低的测试电压下即出现明显局部放电信号。施加相同

脉冲老化时间时,脉冲频率越大,则局部放电起始电压降低幅度越大。这是因为高频脉冲相较于低频能释放更多的空间电荷,并且这些空间电荷会不断碰撞环氧树脂绝缘试件内的环氧分子链,导致材料发生碳化、沉积,形成更多树形放电通道,随着脉冲频率的增加,放电效应加剧,使电树枝相互连接,进一步加剧绝缘材料的劣化进程,进而降低试件的局部放电起始电压。

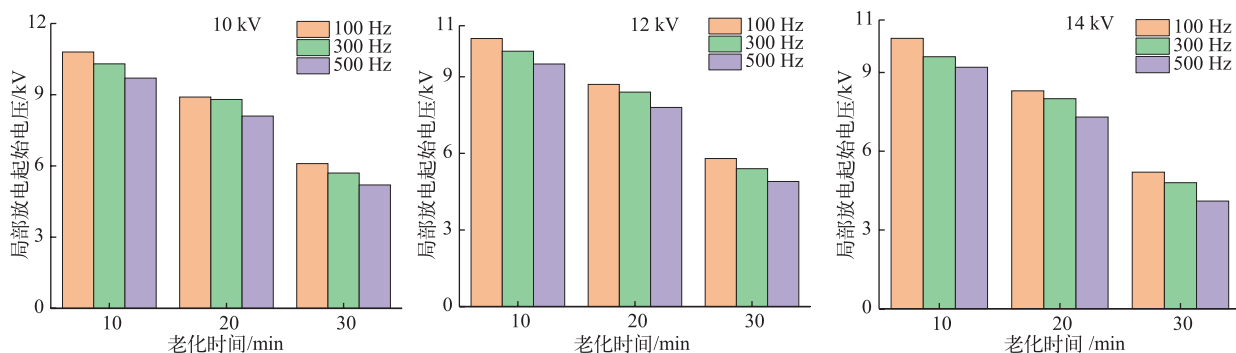


图6 不同脉冲频率老化过程中局放起始电压变化趋势

Fig. 6 Changes trend of partial discharge starting voltage during aging with different pulse frequencies

2.4 脉冲电压幅值对局放起始电压的影响

同一脉冲幅值和频率下,随着脉冲老化时间的延长,环氧树脂复合试件的局部放电起始电压均呈现显著下降趋势,如图7所示。在施加老化时间相同时,局部放电起始电压与施加脉冲电压幅值呈负相关。这是因为脉冲电压幅值越大,则两电极间的电场模越大,激发的极不均匀电场影响范围也越大,因此产生局部放电的概率就越大,并且由于外加电场作用下的介质损耗而产生的热量就越多,因此绝缘材料局部温度大幅升

高,产生的不可逆绝缘破坏也越严重。

从初始放电通道的尖端向环氧树脂复合材料内部入射空间电荷与上述过程在本质上无差别,只是尖端放电强度的不同,高脉冲幅值下环氧树脂复合材料的树枝放电通道尖端空间电荷量的注入强度与注入量较低脉冲幅值相比都有较大提升,因此在脉冲电压老化过程中引起新的放电通道的概率也显著增加,老化后造成的绝缘损伤范围也越大,故局部放电起始电压下降幅度也愈显著。

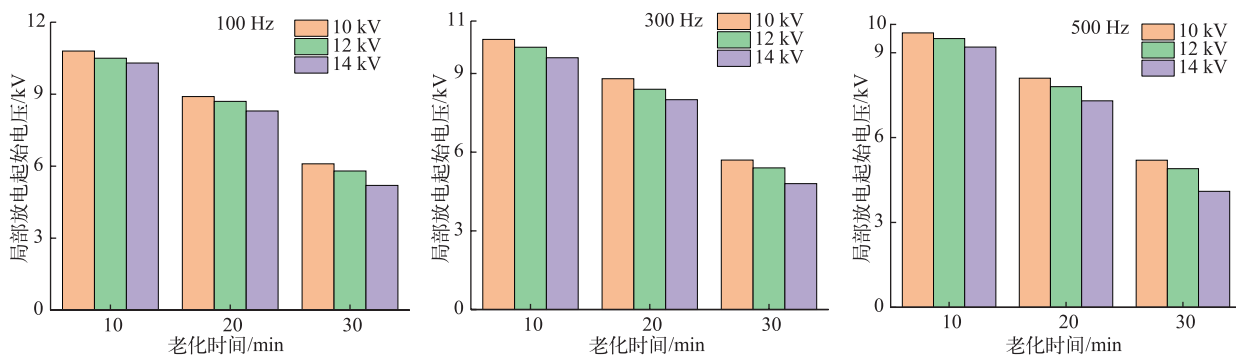


图7 不同脉冲幅值老化过程中局放起始电压变化趋势

Fig. 7 Changes variation trend of local initial voltage during aging of different pulse amplitudes

3 结束语

1) 使用偶联剂处理纳米粒子后使纳米粒子表面更加粗糙,并且新接枝的官能团在固化过程中会与环氧基体相互结合,形成物理交联点,使两者缠绕更加紧密,有效改善纳米粒子在环氧基体内的分散性。

2) 脉冲电压放电次数与脉冲频率满足正比关系,因此与低频相比,较高的脉冲频率会产生更多的空间电荷,加剧材料内部局部放电过程,提高环氧分子与空间电荷的碰撞几率,加剧复合材料的劣化程度。

3) 高脉冲幅值对环氧树脂复合材料的劣化过程具有正向促进作用。与低频相比,高的脉冲幅值会使局部放电量的数量与放电强度都大幅增加,使入陷电荷有能力突破更高的跳跃势垒,显著提高脱陷与迁移速率,并且能大幅增加引起新的放电通道的概率,使复合材料绝缘劣化范围更广。**EA**

参考文献

- [1] 律方成,詹振宇,张立国,等.等离子体氟化改性微米AlN填料对环氧树脂绝缘性能的影响[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3522-3531.
- [2] MOHAMAD A, CHEN G, CHEN Q. Investigation of plasma enhanced-fluorination treatment on epoxy resins for high-voltage DC Applications [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(6), 3786-3793.
- [3] 景贵东. 中压环氧树脂绝缘件产品局部放电问题分析[J]. 电工电气, 2019(10): 74-76.
- [4] 毕全瑞,郝留成,袁端鹏,等. 盆式绝缘子用环氧/氧化铝复合体系固化动力学[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2758-2765.
- [5] 刘熊. 微秒脉冲下环氧树脂沿面闪络与老化特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [6] 高有华,宋佳,杜翰文,等. VFTO对电力变压器绕组暂态电压分布的影响研究[J]. 电气工程学报, 2018, 13(10): 6-10.
- [7] 康钧,李秋阳,李渊,等. 1 100 kV GIS设备振荡冲击试验电压下的波过程仿真计算研究[J]. 高压电器, 2018, 54(2): 20-25, 32.
- [8] 庄丞,曾建斌,袁传镇. 表面异物对252 kV气体绝缘组合电器盆式绝缘子绝缘性能的影响[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4208-4216.
- [9] 郭伟林. 盆式绝缘子表面绝缘特性的影响因素研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [10] 李德,郭海. 气体绝缘组合电器(GIS)典型绝缘缺陷的局部放电模型研究[J]. 科技资讯, 2019, 17(12): 36-37.
- [11] PEARSON J S, FARISH O, HAMPTON B F, et al. Partial discharge diagnostics for gas insulated substations [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 893-905.
- [12] 陈旭. 基于局放检测的气体绝缘组合电器设备故障诊断分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [13] 刘熊,林海丹,梁义明,等. 空气中微秒脉冲沿面放电对环氧树脂表面特性影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 158-165.
- [14] 谢庆,刘熊,吴高林,等. SF₆中环氧树脂纳秒脉冲沿面闪络实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6727-6735, 6926.
- [15] 薛巨邵. 环氧树脂电树枝生长特性与温度影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [16] DU B X, XUE J S, SU J G, et al. Effects of ambient temperature on electrical tree in epoxy resin under repetitive pulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1527-1536.

作者简介



程泉栋

程泉栋(1998—),男,硕士,研究方向为电气工程及其自动化。

(收稿日期: 2021-09-17)