

# 冲击电容器直流叠加操作冲击回路仿真分析

张晨萌<sup>1</sup> 陈芒芒<sup>2</sup> 王鑫<sup>3</sup> 孙鹏宇<sup>2</sup>

- (1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610041;
2. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司 四川 成都 610021;
3. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 直流输电线路中性线上运行的冲击电容器,同时承受直流电压及站内外故障操作冲击电压的影响。基于pscad电磁暂态仿真软件对冲击电容器直流叠加操作冲击电压老化试验回路进行了仿真,分析了该试验回路中直流电压对冲击电压发生器输出波形的影响,以及连接操作冲击电压侧与直流电压侧的耦合电容对试品电压波形的影响。分析认为,直流电压对冲击电压发生器输出波形影响极小,耦合电容取值对试品电压波形影响也极小。仿真结果表明,冲击电容器直流与冲击叠加老化试验具有可行性。

**关键词:** 冲击电容器; 直流电压; 操作冲击电压; 耦合电容

中图分类号: TM89 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)04-0033-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.04.008

## Analysis on Loop Simulation of DC Voltage Superimposed with Switching Impulse Voltage for Surge Capacitors

Zhang Chenmeng<sup>1</sup>, Chen Mangmang<sup>2</sup>, Wang Xin<sup>3</sup>, Sun Pengyu<sup>3</sup>

- (1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China;
3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The surge capacitor running on the neutral line of DC transmission line is affected by DC voltage and switching impulse voltage of the faults inside and outside the station. Based on pscad electromagnetic transient simulation software, the aging test loop of DC voltage superimposed with switching impulse voltage in surge capacitor is simulated. The influence of DC voltage on the output voltage waveform of impulse voltage generator is analyzed as well as the influence of coupling capacitor connected switching impulse voltage side with DC voltage side on the sample voltage waveform. According to the analysis, DC voltage has little influence on the output voltage waveform of impulse voltage generator, and the value of coupling capacitor also has little influence on the sample voltage waveform. The simulation results show that the aging test of DC voltage superimposed with switching impulse voltage is feasible.

**Key words:** surge capacitor; DC voltage; switching impulse voltage; coupling capacitor

## 0 引言

由于中国一次能源中心与负荷中心在地域上跨度很大,为合理优化国家能源配置,充分发挥西南地区水力资源的作用,国家电网公司近年加快了特高压直流输电工程的建设<sup>[1-3]</sup>。中性母线冲击电容器作为直流回路和滤波回路发生故障时的电流通回路

是换流站中性母线保护的重要组成部分。近年来,由冲击电容器故障引发的换流站事故时有发生:2011年7月30日龙政直流中性母线曾发生极中性母线电容器击穿事件<sup>[4]</sup>,宜都站、政平站已经进行了中性线电容更换;2014年5月25日,三广直流工程鹤城站极线故障,极I中性线电容器破裂损毁。

冲击电容器运行条件特殊,目前对冲击电容器的绝缘老化机理、绝缘状态评估方法等在国内外尚

缺乏深入研究。为研究换流站中性母线侧运行的冲击电容器在实际环境中的绝缘老化情况,需要同时考虑正常运行状态下电容器承受的直流电压和故障时侵入电容器的冲击过电压。考虑与电容器并联的避雷器对雷击过电压的限制作用,下面仅模拟对电容器同时施加直流电压和操作冲击电压的情况。

## 1 试验回路

试验电路如图1所示,包含:冲击电压发生器,400 kV/40 kJ,共8级,单极额定电压50 kV,单极电容 $3.99 \mu\text{F}$ ,保护电阻 $48 \text{ k}\Omega$ ,波前电阻及放电电阻阻值见3.2节;冲击电压发生器的对地杂散电容和高压引线及球隙等的电容 $C_{g1}$ 、 $C_{g2}$ ,取 $500 \text{ pF}$ ;  $C_{m1}$ 、 $C_{m2}$ 组成电容分压器,采用MWF400-1200型脉冲电容器,额定冲击电压400 kV,电容值 $1188 \text{ pF}$ ;耦合电容 $C_c$ , $50 \mu\text{F}$ ;冲击电容器试品 $C_s$ ,额定电压12 kV,电容值 $0.6 \mu\text{F}$ ;保护电阻 $R_0$ , $3 \text{ k}\Omega$  整流硅堆STACK;交流220 V电压源;隔离变压器 $T_1$ ;调压变压器 $T_2$ ;升压变压器 $T_3$ 。

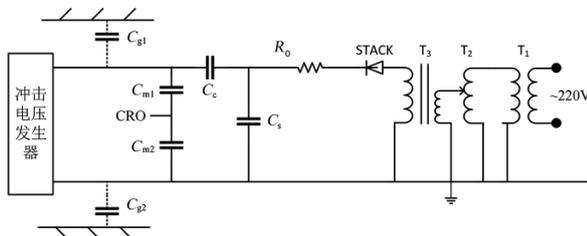


图1 电容器叠加电压老化试验回路

试验回路工作原理如下:

- 1) 交流电源由图1中右侧输入电压,通过整流硅堆使冲击电容器试品 $C_s$ 两端加直流电压。
- 2) 操作冲击电压由图1中左侧冲击电压发生器产生,通过耦合电容 $C_c$ 输出至电容器试品 $C_s$ 两端。 $C_{m1}$ 、 $C_{m2}$ 组成电容分压器用于测量冲击电压发生器输出端电压。
- 3) 直流电压产生部分与操作冲击电压产生部分由耦合电容 $C_c$ 进行连接。耦合电容既可以避免直流电压侵入冲击电压发生器,同时能够保证操作冲击电压无畸变地通过耦合电容加到冲击电容器试品两端。

## 2 试验电压

### 2.1 操作冲击电压

以某 $\pm 500 \text{ kV}$ 直流输电工程首端换流站中性母线

冲击电容器组为对象,电容器组型式及参数见表1。

$\pm 500 \text{ kV}$ 换流站中性线电容器故障电压最大波峰值、波谷值见表2,将明显幅值偏大的数据置于前端。从表2可见仅约15%的故障电压的最大波峰值及最大波谷值远超过平均值。排除15%故障电压偏大值,中性母线故障电压最大波峰平均值为 $1.333 \text{ kV}$ ,中性母线故障电压最大波谷平均值为 $-2.269 \text{ kV}$ ,均远小于电容器单元的额定电压 $13.5 \text{ kV}$ ,经过换算,分别约占电容器单元额定电压的0.985%和1.68%。

表1  $\pm 500 \text{ kV}$ 换流站中性线电容器

型式及参数	参数值
电容器组型式	2并10串再2并
电容器单元额定电压/kV	13.5
电容器单元电容/ $\mu\text{F}$	40
电容器单元电容额定电流/A	63
操作冲击耐受能力/kV	351
操作冲击下避雷器最大残压/(kV/kA)	322/1

表2  $\pm 500 \text{ kV}$ 换流站中性线电容器故障电压

最大波峰/kV	最大波谷/kV
15.172	-15.767
49.731	-63.807
19.541	-22.893
1.653	-4.033
2.807	-4.084
1.455	-3.143
0.946	-1.719
1.129	-1.796
0.977	-1.643
1.638	-2.019
1.75	-2.289
1.343	-2.472
1.139	-1.958
1.17	-1.821
1.038	-1.846
1.129	-1.984
1.149	-2.014
1.144	-2.004
1.165	-1.907
1.038	-1.841

对于研究对象 12 kV、0.6 μF 电容器,取保守偏大值 2%  $U_n$  时,则冲击电压峰值仅为 0.24 kV。GB/T 20993-2012《高压直流输电系统用直流滤波电容器及中性母线冲击电容器》中定义了中性母线冲击电容器组额定电压与电容器组的操作冲击耐受水平(峰值)的关系为<sup>[5]</sup>。

$$U_n = \frac{U_{SIWL}}{2.6} \quad (1)$$

但该标准中仅对端子与外壳间雷电冲击电压试验(型式试验)进行了说明,并未对操作冲击电压试验提供指导意见。

在约占 15% 比例的中性母线故障电压偏大值中,最严重时中性母线故障电压最大波峰值为 49.731 kV,最大波谷值为 -63.807 kV,分别约为电容器单元额定电压的 36.84% 和 47.26%,并且最大波谷值比最大波峰值更大。JB/T 8168-1999《脉冲电容器及直流电容器》中对于冲击电压的直流电容器的耐久性能的定义为:在额定电压下,按规定的波形或电路参数充放电次数达到 10 000 次<sup>[6]</sup>。

综合考虑试验的时间成本及实际故障电压峰值、极性影响,冲击电容器直流电压叠加操作冲击电压老化试验的冲击电压峰值定为  $-1.2U_n$ 、 $-1.5U_n$ 、 $-1.8U_n$ 、 $-2.2U_n$ 、 $-2.6U_n$ ,即 -14.4 kV、-18 kV、-21.6 kV、-26.4 kV、-31.2 kV。

## 2.2 直流电压

同样以 2.1 节中的 ±500 kV 直流输电工程首端换流站中性母线冲击电容器组为对象,中性母线直流电压  $U_0 = I_0 R_0$ ,其中:  $I_0$  为单极大地回线运行时接地极注入电流;  $R_0$  为直流接地极线路电阻与接地极接地电阻之和。该站接地极线路参数如表 3, ±500 kV 换流站接地极接地电阻一般小于 0.1 Ω,此处计算取 0.08 Ω,其误差相对于接地极线路电阻值很小。

表 3 ±500 kV 首端换流站接地极线路参数

名称	参数
线路长度/km	25.3
导线型号	4 × LGJ-630/55
额定电流/A	3000
最大过负荷电流/A	3300(持续 2 h)

所以  $R_0$  为 0.162 225 Ω,  $I_0$  取 3 kA<sup>[7]</sup> 时,得中性母线直流电压为 0.486 675 kV,考虑一定的裕度取 1 kV。

## 3 试验回路仿真

### 3.1 电容器叠加电压老化电路

冲击电容器直流电压叠加冲击电压老化试验回路经过简化,得到电路原理图如图 2 所示。

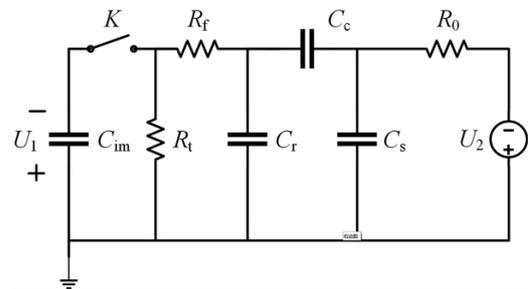


图 2 电容器叠加电压老化电路

图中:  $C_{im}$  为充电电容,取冲击电压发生器 1 级电容,电容值为 3.99 μF;  $R_f$  为波前电阻,Ω;  $R_t$  为放电电阻,Ω;  $C_r$  为不计入试品电容的负荷电容,1688 pF;  $C_c$  为耦合电容,50 μF;  $C_s$  为电容器试品,0.6 μF;  $R_0$  为保护电阻,3 kΩ。

### 3.2 波前电阻及放电电阻

先不考虑直流电压侧影响,假定冲击发生器简化回路为高效率回路(忽略内部阻尼电阻),不考虑回路电感影响,采用简化回路的非近似计算方法,如式(2)。

$$\begin{cases} T_0 = -\left(\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2}\right) \\ R_f = \frac{1}{2C_{r1}} \left( T_0 - \sqrt{T_0^2 - \frac{4(C_{im} + C_{r1})}{s_1 s_2 C_{im}}} \right) \\ R_t = \frac{1}{2(C_{im} + C_{r1})} \left( T_0 + \sqrt{T_0^2 - \frac{4(C_{im} + C_{r1})}{s_1 s_2 C_{im}}} \right) \end{cases} \quad (2)$$

而总负荷电容  $C_{r1}$  由式(3)得到。

$$C_{r1} = C_r + C_c C_s / (C_c + C_s) \quad (3)$$

对 0.6 μF 的冲击电容器试品  $C_s$  而言,串联一个电容值约为其 10 倍的耦合电容  $C_c$ ,其电容值由 0.6 μF 变为 0.593 μF,变化率仅约 1%,对总负荷电容大小的影响很小。而不计入试品电容的负荷电容  $C_r$  为 1688 pF,仅为冲击电容器试品  $C_s$  的 0.28%。综合以上分析,忽略不计入试品电容的负荷电容和耦合电容,得到  $T_0 = 3 217.472$  s,波前电阻  $R_f = 120.157 1$  Ω,放电电阻  $R_t = 683.777 8$  Ω。

为研究直流电压对冲击电压发生器输出波形的影响以及连接操作冲击电压侧与直流电压侧的耦合电容对试品电压波形的影响,基于电磁暂态仿真软件 pscad 使用常用器件搭建了使用时控开关控制的电容器直流叠加操作冲击电压的仿真模型,如图 3 所示。时控开关 BRK 和 BRK1 的断开电阻为  $1\ \Omega$ ,闭合电阻为  $0\ \Omega$ 。仿真时长为  $1.6\ \text{s}$ ,仿真步长  $1\ \mu\text{s}$ ,以  $U_1 = -2.6U_n = -31.2\ \text{kV}$  交流电源降低至波谷的时刻  $1.425\ \text{s}$  为动作时刻,在  $1.425\ \text{s}$  前开关 BRK1 闭合,开关 BRK 打开,在  $1.425\ \text{s}$  时刻打开开关 BRK1,闭合开关 BRK,得到冲击电压发生器输出端电压波形,这同时也是电容器试品承受的电压波形(见图 4)。为便于观察,冲击电压发生器输出波形及试品两端电压波形均为反极性波形。

图 4 的无耦合电容冲击电压发生器输出电压波形为  $419\ \mu\text{s}/3909\ \mu\text{s}$ ,峰值为  $30.925\ \text{kV}$ 。IEC 60060-1:1989 及国家标准 GB/T 16927.1-2011 规定的标准操作冲击电压的波前时间  $T_f$  为  $250 \pm 20\% \mu\text{s}$ ,即  $200 \sim 300\ \mu\text{s}$ ,半峰值时间  $T_1$  为  $2500 \pm 60\% \mu\text{s}$ ,即  $1000 \sim 4000\ \mu\text{s}$ 。此时操作冲击电压波头时间超过了规定范围。

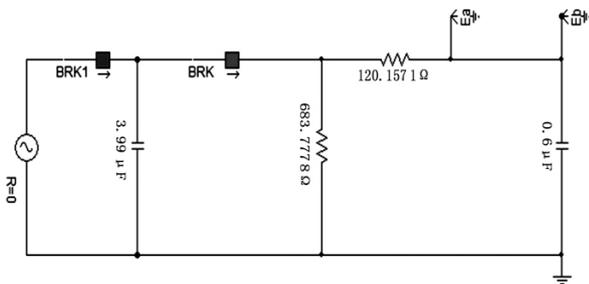


图 3 无耦合电容叠加电压老化电路

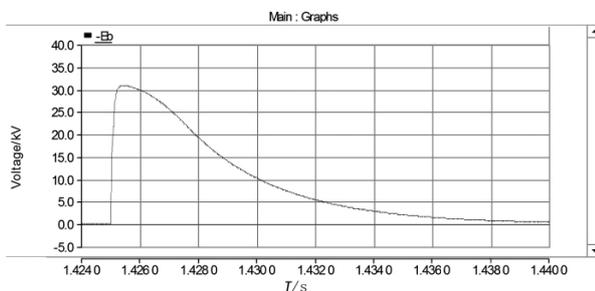


图 4 无耦合电容冲击电压发生器输出电压波形

修正电路将波前电阻  $R_f$  降低至  $70\ \Omega$  后,得到操作冲击电压波形为  $280\ \mu\text{s}/3645\ \mu\text{s}$ ,峰值为  $31.08\ \text{kV}$ 。

### 3.3 直流电源

在老化试验电路中考虑直流电源及保护电阻  $3\ \text{k}\Omega$  后,调整直流电源电压至  $5\ \text{kV}$ ,冲击前电容器试品两端直流电压约  $1\ \text{kV}$ 。操作冲击电压波形  $276\ \mu\text{s}/3542\ \mu\text{s}$ ,

幅值  $30.49\ \text{kV}$  如图 5 所示。可见,直流电源对混合冲击电压波形影响极小,但在无耦合电容连接冲击电压发生侧和直流电压侧时,需要大幅提高直流侧电压至  $5\ \text{kV}$  来使电容器试品两端直流电压达到试验要求。

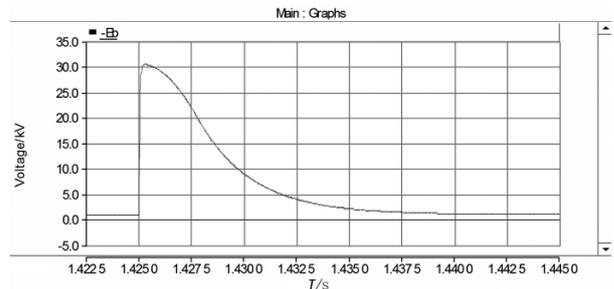


图 5 无耦合电容修正电路电容器试品叠加冲击电压波形

### 3.4 耦合电容

耦合电容  $C_c$  电容值为  $50\ \mu\text{F}$ 。仿真时长调整为  $2.6\ \text{s}$  时控开关动作时间调整为  $2.425\ \text{s}$ ,直流电源电压调整为  $1\ \text{kV}$ ,此时冲击电压发生器输出端电压波形如图 6,冲击波形为  $274\ \mu\text{s}/3477\ \mu\text{s}$ ,峰值  $30.4\ \text{kV}$ ,而冲击发生前电压基本为 0,与无耦合电容下冲击电压波形及幅值基本一致。因此,可以认为直流电源对冲击电压发生器的冲击电压并无影响。电容器试品上的叠加冲击波形为  $263\ \mu\text{s}/3467\ \mu\text{s}$ ,峰值  $31\ \text{kV}$ ,如图 7 所示。可见带耦合电容后,电容器试品端电压峰值由  $30.49\ \text{kV}$  增大至  $31\ \text{kV}$ ,变化幅度约  $1.67\%$ 。

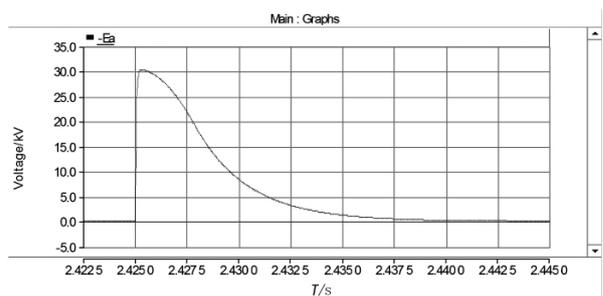


图 6 有耦合电容修正电路冲击电压发生器输出电压波形

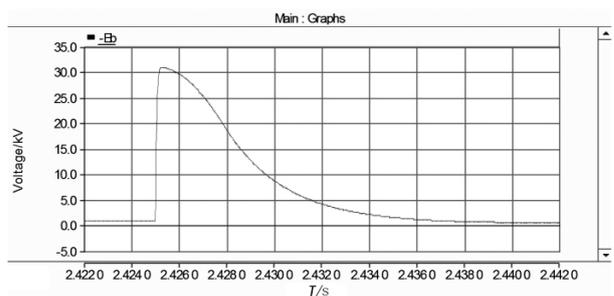


图 7 有耦合电容修正电路电容器试品电压波形

### 4 结 论

- 1) 在无耦合电容的条件下,直流电源电压需大幅提高才能达到电容器试品未冲击前直流电压的试验要求。
- 2) 在有耦合电容的条件下,耦合电容能有效限制直流侧电压对冲击电压发生器未动作时的影响。
- 3) 本试验条件下,有、无耦合电容对试品叠加电压波形的影响很小,耦合电容对冲击电压发生器效率的影响可以忽略。

#### 参考文献

[1] 孙昕,刘泽洪,高理迎,等. ±800 kV 特高压直流工程创新实践[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(22): 35-45.  
 [2] 舒印彪,刘泽洪,高理迎,等. ±800 kV 6400 MW 特高压

直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-8.  
 [3] 舒印彪,刘泽洪,袁骏,等. 2005 年国家电网公司特高压输电论证工作综述[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 1-12.  
 [4] 雷霄,王明新,王华伟,等. 龙政直流闭锁事件分析及降压再启动直流电压偏高抑制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 129-133.  
 [5] 高压直流输电系统用直流滤波器电容器及中性母线冲击电容器: GB/T 20993-2012[S], 2012.  
 [6] 脉冲电容器及直流电容器: JB/T 8618-1995[S], 1995.  
 [7] 叶杰宏. 直流单极运行对 500 kV 交流变压器的影响[J]. 电气时代, 2011, 47(3): 84-86.  
 [8] 高电压试验技术第 1 部分: 一般定义及试验要求: GB/T 16927.1-2011[S], 2011.

#### 作者简介:

张晨萌(1988), 博士, 主要从事电力系统过电压、电容器绝缘介质方面研究。(收稿日期: 2019-06-04)

(上接第 23 页)

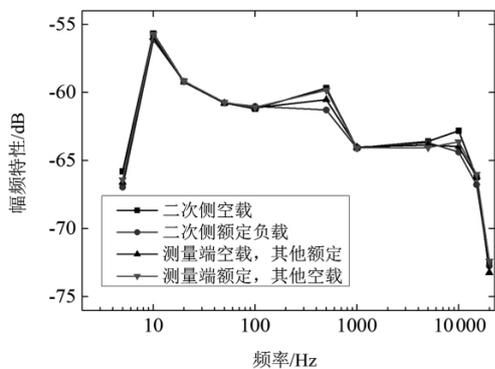


图7 存在内置低压电容时 CVT 幅频特性

### 3 结 语

对基于 CVT 的过电压在线监测装置在不同负载情况下的频率特性进行了研究, 所得结论如下:

- 1) 当 CVT 二次侧接额定负载或空载状态时, 测量得到的频率特性整体呈相似状态, 仅在部分频率处存在较小的差别;
- 2) 当 CVT 二次侧负载较重时, 测量得到的频率特性与额定负载情况下具有较明显的差别, 且高频下衰减更为严重;
- 3) 额定负载和空载情况对内置低压电容高压侧频率特性影响较小, 且内置低压电容的存在也几乎不对 CVT 不同负载情况下的频率特性产生影响。

#### 参考文献

[1] 张重远,李文博,陈涛. 基于 TV 宽频特性的过电压在线监测算法[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 801-807.  
 [2] 郑必成,傅煜. 500 kV GIS 开关站快速暂态过电压计算及对主变的影响[J]. 高压电器, 2012, 48(12): 135-138.  
 [3] Jayaram S, Xu X Y, Cross J D. High Divider Ratio Fast Response Capacitive Dividers for High-voltage Pulse Measurements[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(3): 920-922.  
 [4] 周凯,何珉,熊庆,等. 基于两级分压器的 6~35 kV 系统过电压在线监测装置[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3583-3589.  
 [5] 兰海涛,司马文霞,姚陈果,等. 高压电网过电压在线监测数据采集方法研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 79-82.  
 [6] 罗易桥,毛宇翔,甘黎. 变电站雷电侵入波过电压测量技术综述[J]. 电工文摘, 2017(6): 11-14.  
 [7] 傅晨钊,刘兆林,杨凌辉,等. 基于 500 kV CVT 内置低压电容  $C_3$  的暂态过电压在线监测[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 77-84.  
 [8] 司文荣,贺林,金珩,等. 500 kV CVT 内置低压电容  $C_3$  测量过电压波形的试验研究[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(2): 81-86.  
 [9] 李文博. 基于 CVT 宽频线性模型的过电压在线监测方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

#### 作者简介:

张 榆(1986), 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电网电磁暂态过程监测、分析及仿真。

(收稿日期: 2019-06-04)