

## 中性点非有效接地系统电压互感器故障分析与治理措施研究

申文伟<sup>1</sup>, 何峰<sup>1</sup>, 鲍新<sup>1</sup>, 白凡<sup>1</sup>, 房民<sup>1</sup>,  
朱鸿燕<sup>1</sup>, 孟繁国<sup>1</sup>, 张冠军<sup>2</sup>, 田燕山<sup>3</sup>

(1. 国网山东省电力公司济南供电公司, 济南 250012; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049;  
3. 国家电网公司交流建设分公司, 北京 100052)

**摘要:** 目前10~35 kV中性点非有效接地系统内电压互感器(PT)高压熔断器熔断、互感器烧毁等故障(统称PT故障)频发,严重威胁电力系统的安全运行。文中统计分析电网系统内26起PT故障,探讨了PT故障的深层原因,并结合故障原因对现有的各类消谐方式进行了对比研究。研究发现,PT故障的本质原因是PT过励磁导致热损坏,具体可归为两类原因,88%的PT过励磁故障由间歇性弧光接地过电压引起,均发生在10 kV中性点经消弧线圈接地系统;仅有12%由铁磁谐振过电压引起,均发生在35 kV中性点不接地系统。笔者认为,抑制PT过励磁的关键是限制PT本身承载的弧光接地过电压和铁磁谐振过电压。然而,现有的消谐措施多侧重于消除铁磁谐振过电压,对弧光接地过电压的限制不够有效。基于上述分析,文中推荐一种新型热敏电阻限流消谐装置,兼有PT限流与消谐功能,具有优良的“自适应”特性,初步应用效果良好,能够有效防止PT故障发生,具有广阔的应用前景。

**关键词:** 电压互感器; 弧光接地; 铁磁谐振; 过励磁; 限流消谐电阻

## Study of Potential Transformer Fault and Mitigation Measures in Power System with Non-direct Grounding Neutral Point

SHEN Wenwei<sup>1</sup>, HE Feng<sup>1</sup>, BAO Xin<sup>1</sup>, BAI Fan<sup>1</sup>, FANG Min<sup>1</sup>, ZHU Hongyan<sup>1</sup>,  
MENG Fanguo<sup>1</sup>, ZHANG Guanjun<sup>2</sup>, TIAN Yanshan<sup>3</sup>

(1. Ji'nan Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Ji'nan 250012, China;  
2. State Key Lab of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;  
3. State Grid AC Engineering Construction Company, Beijing 100052, China)

**Abstract:** The fusing of potential transformer(PT)fuse and the burning of PT(generally referred to as the PT fault)occur multi-times in non-direct grounding neutral system, which is a serious threat to the safe operation of power system. In this paper, the causes of 26 PT faults in the grid system and the present protective measures are analyzed. It is found that the fundamental cause of PT fault is PT over-excitation and over-heating damage,88% of which is caused by intermittent arc grounding overvoltage(in 10 kV grounding neutral system via arc suppression coil), and only 12% of which is caused by ferro-resonance overvoltage(in 35 kV non-grounding neutral system). The key to inhibiting PT over-excitation is to limit the arc grounding overvoltage and ferro-resonance overvoltage. The present measures are merely focused on eliminating the ferro-resonance overvoltage, while the limitation of the arc grounding overvoltage is not effective. Therefore, a new type of thermistor device with both current limiting and resonance elimination functions is highly recommended. The technique employs both current limiting and resonance elimination functions, which shows excellent adaptive feature and good effect of PT fault elimination and enjoys a promising prospect in application.

**Key words:** potential transformer; arcing ground; ferro-resonance; over-excitation; current limiting and resonance elimination thermistor

## 0 引言

目前,电网10 kV系统一般采用中性点消弧线

圈接地,35 kV系统一般采用不接地方式,两者统称中性点非有效接地系统。为了测量三相对地电压和监视对地绝缘,在变电站的低压母线段上接有电

磁式电压互感器(以下简称PT),且PT的中性点直接接地。PT高压侧接有高压熔断器作为保护,两者共同安装在专设的PT开关柜内。

运行经验表明,电网系统内经常发生PT高压熔断器异常熔断、PT设备烧毁等故障(文中统称PT故障),严重威胁作业人员的人身安全,同时产生巨大的设备损失,甚至可能引起母线短路、主变掉闸等电网停电事故<sup>[1-3]</sup>。

研究表明,PT故障的本质原因是PT过励磁。单相弧光接地或铁磁谐振均能造成PT过励磁。一方面,单相接地电弧熄灭或重燃时,线路对地电容电荷进行重新分配,此过程中将形成电磁振荡并产生过电压,最高过电压倍数可达3.5倍,从而导致PT过励磁。频繁间歇性弧光接地使PT过励磁发热,最终可能引起PT固体绝缘失效<sup>[4]</sup>。另一方面,35 kV中性点不接地系统中,在一定电网扰动(操作冲击或单相接地)条件下,如果PT被激发铁磁谐振,铁磁谐振将会持续相当长时间,导致PT长时间处于过励磁状态,最终将会造成严重的PT故障。

需要指出的是,目前高压开关柜装设的PT普遍采用干式固体绝缘(环氧树脂材料),耐热等级为F级(最高温升100 K)。与油纸复合绝缘相比,固体绝缘材料具有“累积效应”<sup>[5-7]</sup>,多次过电压或过热产生的劣化影响将会不断积累,最终形成绝缘故障。

文中统计并分析了近4年电网系统的PT故障情况,深入探讨了PT过励磁的根本原因,并对对比分析了现有的各类PT消谐措施的局限性,推荐了一种新型热敏电阻限流消谐装置。该装置具有优异的“自适应”特性,已在电网系统内得到初步应用,且应用效果良好,具有良好的推广前景。

## 1 PT故障统计

文中统计了2013年7月至2016年9月期间的26起电网系统PT故障,故障造成的设备损坏情况见图1。

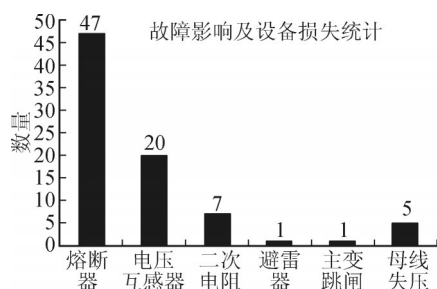


图1 PT故障造成的设备损坏和电网跳闸情况统计结果

Fig. 1 Statistics of equipment damages and power grid trippings caused by PT failure

统计表明,PT故障造成了较为严重的设备及电网损失,包括47支熔断器熔断,20台PT损毁,7套二次消谐电阻烧毁,1台避雷器爆炸,1台220 kV主变跳闸,5段10 kV母线失压,对人身、电网和设备安全构成了严重威胁。

如前所述,这些故障发生的本质原因是PT过励磁,进一步分析挖掘PT过励磁的原因,发现只有3起故障明确定性为铁磁谐振过电压(I类故障),均发生在35 kV中性点不接地系统;其他故障均由间歇性弧光接地过电压导致PT多次过励磁导致(II类故障),一般发生在10 kV中性点经消弧线圈接地系统。根据事故原因分类结果见图2。

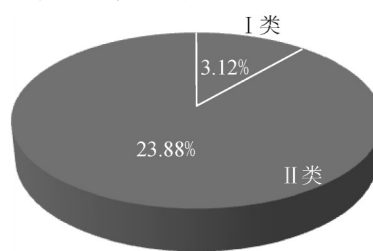


图2 I类故障和II类故障所占比例(I类故障原因:铁磁谐振过电压;II类故障原因:间歇性弧光接地过电压)

Fig. 2 The proportion of fault 1 and fault 2(fault 1 caused by ferro-resonance overvoltage; fault 2 caused by intermittent arc grounding overvoltage)

### 1.1 I类故障实例

2016年4月22日某220 kV变电站35 kV 1段母线两次高频谐振故障。

1)故障过程。13:30在对空载的35 kV 1段母线充电时发生谐振,A、C相电压升高,B相电压降低,并形成“虚幻接地”现象,操作人员立即拉开1号主变35 kV侧307开关。15:45再次试送1号主变35 kV侧307开关,35 kV 1段母线再次发生谐振,二次电阻过热轻微冒烟,操作人员立即将1号接地变送电后,谐振消除。

2)原因分析。1号主变对35 kV 1段空载母线充电时,PT电感与空载母线对地电容发生铁磁谐振。通过对故障波形分析发现波形中含有大量二次、三次谐波,判定为高频谐振。此次故障虽未造成设备损坏,但对电网和设备运行安全构成了极大的威胁。

### 1.2 II类故障实例

2015年4月26日某220 kV变电站10 kV 4段PT故障。

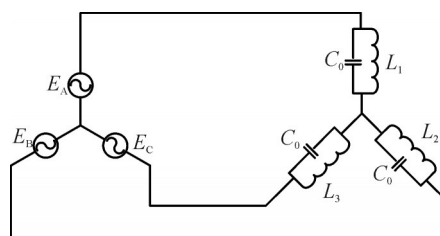
1)故障过程。故障前3号主变带10 kV 3、4段母线并列运行。15:56:28,10 kV 3、4段母线B相接地;15:57:37,4段母线A相PT开始进入饱和状态;约15.8 s后A相PT故障,同时刻B相接地恢复;约18.8 s后,B相PT故障;约53 s后,C相PT熔断器熔断。

故障后检查发现:三相PT二次端子排已烧焦,A、B相PT完全损毁,C相PT外壳开裂、胶状内容物流出。A、B相熔断器未熔断,C相熔断器熔断。

2)原因分析。分析故障录波发现,B相间歇性弧光接地造成PT频繁过励磁发热,而其高压熔断器的额定电流(2 A)过大无法有效熔断,造成三相PT绝缘长时间过热击穿,最终三相PT故障损毁。

## 2 I类故障(铁磁谐振)的原理

中性点不接地系统的等值电路见图3,PT励磁电感与系统对地电容形成并联谐振回路,在某些条件下将会激发铁磁谐振现象。



$E_A, E_B, E_C$  为 10~35 kV 系统等效电源;  
 $L_1, L_2, L_3$  为 PT 等效电感;  $C_0$  为线路对地等效电容。

图3 中性点非有效接地系统的等值电路

Fig. 3 Equivalent circuit of non-direct grounding neutral system

线路对地等效容抗为  $X_{C0}$ , PT 对地等效电抗为  $X_m$ , 正常运行时,  $X_{C0} \ll X_m$ ,  $X_{C0}/X_m$  系统不发生谐振;但在某种电网扰动的激励作用下, PT 铁心发生饱和导致  $X_m$  减小, 当  $X_{C0}/X_m > 0.01$  时<sup>[8]</sup>, 系统就可能发生铁磁谐振。

铁磁谐振主要分为基波谐振、高频谐振和分频谐振3种形式。发生谐振时, 通常两相电压升高, 一相电压降低, 并形成“虚幻接地”现象, 铁磁谐振导致 PT 铁心饱和, 励磁电流倍增。铁磁谐振一旦被激发, 持续时间较长, 只有谐振条件被破坏才可能中止。

需要指出, 1/2 分频谐振区域的参数区间最大<sup>[9]</sup>, 且危害最为严重, 一旦发生分频谐振, PT 铁心将进入深度饱和, 导致 PT 严重的过流、过热故障。

在中性点非有效接地系统中, 铁磁谐振通常由以下两种扰动条件激发:

1) 系统间歇性单相接地形成弧光接地过电压或者单相接地恢复时非故障相电容电荷通过 PT 中性点释放, 两者均能引起 PT 铁心饱和并激发铁磁谐振。

2) 电气设备突然投、切操作。个别变电站的母线及对地容抗  $X_{C0}$  与 PT 电抗  $X_m$  非常接近, 处于易发

生谐振的临界点, 对空载母线突然合闸充电形成操作过电压, 进而激发铁磁谐振。

## 3 II类故障(弧光接地过电压)的原理

10 kV 系统内发生了多起 PT 故障, 占统计事故的 88%。对于 10 kV 中性点经消弧线圈接地系统, 由于 PT 励磁阻抗远大于消弧线圈电抗, 相当于 PT 励磁电抗被短接, 因此不具备铁磁谐振的条件。

II 类故障主要由间歇性弧光接地过电压导致, 其原理见图 4。假如系统 C 相接地, 非故障 A、B 相充以与线电压对应的电容电荷; 当电弧熄灭时, A、B 两相电压恢复至相电压, 其电荷将重新分配至三相; 经过半个周期后电弧重燃, 电荷将再次重新分配。电弧熄灭或重燃后的电荷分配实际是一种电磁振荡过程, 能够形成最高可达 3.5 倍的过电压。频繁的弧光接地过电压引起 PT 过励磁, 最终引发 PT 过热故障。

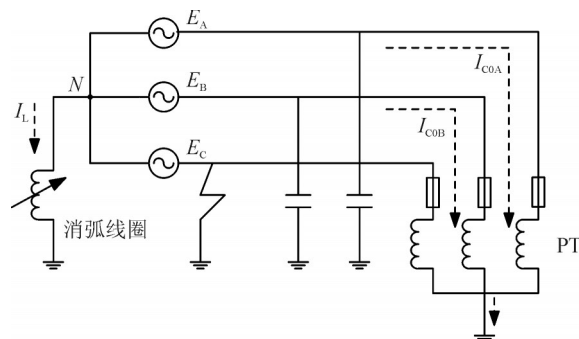


图4 II类故障(弧光接地过电压)电荷分配过程示意图

Fig. 4 A schematic diagram of the charge distribution process of fault 2 (caused by intermittent arc grounding overvoltage)

需要指出, 目前城市电缆化率不断提高, 造成系统电容电流急剧增加, 如果消弧线圈容量不足, 电弧可能发生多次重燃, 弧光接地引起的电磁振荡过程更加剧烈, 这是 PT 故障多次发生的重要原因。

## 4 现有消谐措施的局限性

《DL/T 620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》、《国家电网公司变电运维管理规定(试行)第7分册 电压互感器运维细则》规定, 为防止铁磁谐振过电压, 中性点不接地系统中的铁磁式电压互感器一次中性点或二次回路应装设消谐装置<sup>[8, 10]</sup>。目前相关的消谐措施主要包括: 改善 PT 的励磁特性、一次侧串接单相零序 PT、二次开口三角接入消谐电阻或消谐装置、一次侧串接压敏消谐电阻等。文中对这些消谐方式进行对比分析。

1)改善 PT 励磁特性,提高 PT 励磁特性的饱和点电压。PT 励磁特性的饱和点电压过低,在运行过程中容易进入 PT 铁心饱和状态。提高 PT 励磁特性的饱和点电压能有效提高 PT 抗过励磁能力,降低 PT 故障率。国网十八项反事故措施规定<sup>[11]</sup>:对于中性点非有效接地系统,电磁式电压互感器的饱和点电压应大于  $1.9U_m/1.732(U_m$  为线电压峰值)。然而大量更换当前非有效接地系统的老旧 PT 需耗费大量资源,产生巨大浪费,不具现实操作性。

2)在 PT 高压侧中性点串接单相 PT,同时要求将 PT 开口三角绕组短接。该措施在早期敞开式 10 kV/35 kV 系统使用,受高压开关柜空间限制,无法在 PT 柜内再增加一台零序 PT<sup>[9,12-13]</sup>。其缺点主要有:一是破坏了 PT 中性点接地条件,影响 PT 测量精度和性能;二是单相接地或谐振时,闭口三角绕组内形成很大环流,PT 负荷增加,极易引发 PT 过热故障;三是 PT 开口三角绕组被短接后,无法发出系统单相接地信号。

3)PT 二次开口三角绕组接入阻尼电阻或数字消谐装置。二次电阻阻值应满足:  $R_\Delta < 0.4X_m/K_{13}^2(K_{13}$  为 PT 一次绕组与开口三角绕组的变比)<sup>[14-17]</sup>,该电阻阻值很小(约数 kΩ)。二次消谐存在两个缺陷:一是不具备一次限流功能,因此对于 II 类故障不起作用;二是电阻热容量小,单相接地或铁磁谐振均在开口三角绕组形成零序电压,可能导致二次电阻长时间过热烧毁。运行经验表明,二次电阻发热烧毁的案例很多,且对 II 类故障无限流效果,这是二次消谐的重要缺陷。

4)在 PT 高压侧中性点侧串接碳化硅电阻,增加谐振回路阻尼。碳化硅电阻是一种类似于氧化锌避雷器的压敏电阻,具有非线性伏安特性:正常运行条件下呈现为高阻(约百 kΩ)特性;当铁磁谐振或电荷转移引起零序电流增加时,其阻值快速下降(几十 kΩ)<sup>[18-19]</sup>。上述电阻特性存在两个缺点:一是正常运行时阻值过大可能导致 PT 三相电压不平衡;二是 PT 过励磁时,阻值太小,消谐和限流功能下降,不利于抑制 PT 故障发生。

## 5 热敏电阻(PTC)限流消谐器

对于 I 类故障,PT 铁磁谐振决定于系统的零序回路参数,在 PT 中性点串入阻尼电阻,可以破坏谐振条件。理想的阻尼电阻,在正常运行状态下为零,不改变 PT 的零序回路,同时不放大中性点不平衡电压;在谐振发生时,电阻自动趋于  $\infty$ ,相当于互感器中性点不接地,从而破坏了谐振回路。

对于 II 类故障,应在 PT 中性点串入阻尼电阻,对流过 PT 中性点的励磁涌流加以限制,从而防止 PT 过励磁发热。为了保证限流效果,阻尼电阻应具备“阻值随冲击涌流的上升而增大”的特点。

基于此思路,文中推荐一种热敏电阻(positive temperature coefficient, PTC)限流消谐装置(简称 PTC 限流消谐电阻)<sup>[20]</sup>。

### 5.1 性能

PTC 限流消谐电阻采用热敏电阻材料,其电阻具有正温度系数,可在一定的转变温度(居里温度点)下发生相变,其电阻率迅速增加至极限值(可增大 5 个数量级);反之,当热敏电阻从高温的环境降至常温时,其阻值也会随之恢复至低阻状态。

PTC 限流消谐电阻的接线示意图见图 5,将 PTC 限流消谐电阻串联安装在 PT 中性点与地之间,正常运行状态下电阻约为 40 kΩ,而 PT 一次绕组的阻抗为 MΩ 级,因此不会对 PT 的各项性能产生影响;当发生谐振或电荷转移时,PTC 限流消谐电阻因过流发热而温度升高,电阻快速增长,发挥良好的阻尼和限流作用。当谐振消失后,电阻随着温度下降,自动恢复至低阻值状态,使得 PT 自动恢复至正常运行状态。

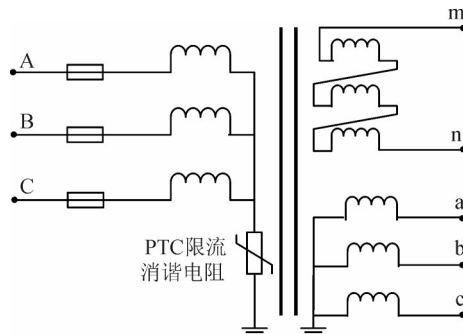


图5 PTC 限流消谐电阻的接线示意图

Fig. 5 A schematic diagram of PTC current limiting and resonance elimination thermistor wiring

上述特性表明,PTC 限流消谐电阻具有优异的“自适应”特性,即谐振能量越大,消谐时间越短;冲击涌流越大,限流作用越强。试验结果表明,PTC 限流消谐电阻的限流消谐性能十分优异,对于基波/倍频谐振的消谐时间约为 1.56 s,分频谐振的消谐时间约为 2.1 s 左右;在  $3.5U_m/1.732(U_m$  为线电压峰值)过电压下,PTC 消谐电阻能够将 PT 最大励磁电流限制在 100 mA 以下<sup>[20]</sup>。

### 5.2 特点

1)PTC 限流消谐电阻结构简单、体积小,可方便安装在高压开关柜内部;

2)具备限流、消谐双重功能,有效防止 PT 过

励磁;

3)具有“自适应”特性,正常运行时,PTC限流消谐电阻呈现低阻,不改变电压互感器的运行工况;发生谐振或涌流时,电阻因快速发热表现为高阻特性,从而实现快速消谐和限流功能。

### 5.3 应用情况

PTC限流消谐电阻已在电网系统某公司获得普遍应用。使用该装置前,每年发生过多次PT故障,这些变电站安装该装置后再未发生PT故障,说明PTC限流消谐电阻对谐振和限流的抑制作用十分有效。文中统计了该公司部分变电站的安装使用情况,见表1。

表1 PTC限流消谐电阻在电网内的安装使用情况

Table 1 Application of PTC current limiting and resonance elimination thermistor in the power grid

| 变电站  | 安装位置        | 安装前PT故障次数 | 安装后PT故障次数 |
|------|-------------|-----------|-----------|
| 瓷窑堡变 | 35 kV II 母线 | 1         | 0         |
| 青山变  | 35 kV I 母线  | 1         | 0         |
| 萌城变  | 35 kV I 母线  | 1         | 0         |
| 冯记沟变 | 35 kV I 母线  | 2         | 0         |
| 大水坑变 | 10 kV I 母线  | 2         | 0         |

## 6 结论

文中结合电网PT故障实际案例,分析了两类PT故障的深层原因,对比分析了各类消谐措施的局限性,最后介绍了一种热敏电阻消谐装置,并得出以下结论:

1)PT故障的本质原因是PT过励磁,PT故障原因有两种:I类故障一般发生在35 kV中性点不接地系统,由铁磁谐振引发;II类故障占绝大部分,通常发生在10 kV中性点经消弧线圈接地系统,由弧光接地过电压导致。

2)现有的各类消谐措施均存在一定的局限性,且对发生率最高的II类故障没有抑制效果。

3)PTC限流消谐电阻具有优异的“自适应”特性,同时兼备消谐与限流功能,对两类PT故障均能有效治理,应用效果良好,具有广阔的推广应用前景。

### 参考文献:

- [1] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京:水利电力出版社, 1985:278-282.  
XIE Guangrun. Electric power system overvoltage[M]. Beijing:China Water & Power Press, 1985:278-282.
- [2] 董振亚. 对当前城市电网建设和改造中若干技术热点问

题的思考[J]. 电网技术, 1999, 23(3):66-70.

DONG Zhenya. Consideration of some technical problems in construction and renovation of urban power network[J]. Power System Technology, 1999, 23(3):66-70.

- [3] 梅成林,张超树. 电压互感器铁磁谐振分析[J]. 电网技术, 2008, 32(s2):311-313.

MEI Chenglin, ZHANG Chaoshu. Analysis of voltage transformer ferroresonance[J]. Power System Technology, 2008, 32(s2):311-313.

- [4] 金雄飞,李之昆. 电力系统铁磁谐振研究现状[J]. 四川电力技术, 2004(1):10-13.

JIN Xiongfei, LI Zhikun. Current situation of ferromagnetic resonance in power system[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2004(1):10-13.

- [5] 束洪春,赵兴兵,彭仕欣. 中压电网铁磁谐振及TV高压保险熔断分析与抑制措施[J]. 中国电力, 2009, 42(1):17-23.

SHU Hongchun, ZHAO Xingbing, PENG Shixin. Analysis and preventive measures study on ferromagnetic resonance and TV high voltage fuse breaking in MV network[J]. Electric Power, 2009, 42(1):17-23.

- [6] 严璋,朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 第2版. 北京:中国电力出版社, 2007:68-70.

YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage and insulation technology[M]. 2nd ed. Beijing:China Electric Power Press, 2007:68-70.

- [7] 王文洁,王泱,古海滨. 电磁式电压互感器引发的铁磁谐振的研究[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(6):43-46.

WANG Wenjie, WANG Yang, GU Haibin. Electromagnetic PT excited ferroresonance[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33(6):43-46.

- [8] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合:DL/T 620—1997[S]. 1997:4-5.

Overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations:DL/T 620—1997[S]. 1997:4-5.

- [9] 周默,孙岩洲. 电网中性点不同接地方式下铁磁谐振的消谐研究[J]. 高压电器, 2015, 51(1):80-85.

ZHOU Mo, SUN Yanzhou. Eliminating ferro-resonance for distribution network with different neutral grounding modes[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1):80-85.

- [10] 国家电网公司变电运维管理规定(试行)第7分册电压互感器运维细则[S]. 2017:1-3.

State grid Regulation of substation operation and maintenance(trial) No. 7: Voltage transformer operation and maintenance rules[S]. 2017:1-3.

- [11] 国家电网公司运维检修部. 国家电网公司十八项电网重大反事故措施(修订版)[M]. 北京:中国电力出版社, 2012:55-58.

Department of Operation and Maintenance of State Grid Corporation of China. Eighteen major anti-accident measures

- of state grid corporation of China(revised version)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012:55-58.
- [12] 黄丽云, 张 焰. 电网铁磁谐振的产生机理与 10 kV 配网铁磁谐振的小波分析[J]. 高压电器, 2006, 42(4): 253-255. HUANG Liyun, ZHANG Yan. The generating mechanism of ferromagnetic resonance in the grid and the wavelet analysis of 10 kV distribution network ferromagnetic resonance[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(4): 253-255.
- [13] 张永胜, 刘守豹. 配电网铁磁谐振综合抑制措施研究[J]. 高压电器, 2016, 52(11): 137-142. ZHANG Yongsheng, LIU Shoubao. Research on the comprehensive control of ferromagnetic resonance in distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 137-142.
- [14] 汪 伟, 周剑玲, 汲胜昌, 等. 35 kV 系统中性点不同接地方式对铁磁谐振的影响研究[J]. 高压电器, 2010, 46(1): 93-96. WANG Wei, ZHOU Jianling, JI Shengchang, et al. Impact of neutral grounding mode on ferroresonance in 35 kV power system[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(1): 93-96.
- [15] 杜志叶, 阮江军, 王伟刚. PT 铁损对铁磁谐振的影响分析[J]. 高压电器, 2005, 41(4): 257-259. DU Zhiye, RUAN Jiangjun, WANG Weigang. Analysis of PT core loss effects on ferroresonance[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(4): 257-259.
- [16] 李华伟, 陈 铮, 施 围, 等. 母线上加装电容器组与铁磁谐振过电压[J]. 高压电器, 1998, 34(6): 38-42. LI Huawei, CHEN Zheng, SHI Wei, et al. Installation of the capacitor on the electric bus and ferromagnetic resonance overvoltage[J]. High Voltage Apparatus, 1998, 34(6): 38-42.
- [17] 周建军, 樊高瑞. 10 kV 防谐振 PT 二次回路分析[J]. 高压电器, 2006, 42(6): 475-477. ZHOU Jianjun, FAN Gaorui. Analysis of 10 kV anti-resonance PT secondary circuit[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6): 475-477.
- [18] 梁志瑞, 董 维, 刘文轩, 等. 电磁式电压互感器的铁磁谐振仿真研究[J]. 高压电器, 2012, 48(11): 18-23. LIANG Zhirui, DONG Wei, LIU Wenxuan, et al. Simulation analysis on ferroresonance of potential transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 18-23.
- [19] 高 鹏, 马江泓, 刘富元, 等. 非有效接地系统中电压互感器防谐振措施研究[J]. 电网与水力发电进展, 2008, 24(1): 24-28. GAO Peng, MA Jianghong, LIU Fuyuan, et al. Study on various treatments to eliminate ferroresonance of potential transformer in non-effective earthing system[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2008, 24(1): 24-28.
- [20] 吴旭涛, 艾绍贵, 樊益平, 等. 热敏电阻型一次限流消谐器的研究及应用[J]. 宁夏电力, 2008(6): 35-38. WU Xutao, AI Shaogui, FAN Yiping, et al. The study and application of the primary current limiting harmonic excluder for the type of the thermal resistor[J]. Ningxia Electric Power, 2008(6): 35-38.
- 申文伟(1988—), 男, 工程师, 主要从事智能电网运检技术、电力设备在线监测与诊断技术研究。