

电磁式电压互感器用熔断器频繁熔断 原因分析及解决措施

张春丽¹, 刘红文², 方鹏兴³, 柴晨超⁴, 张雯琼⁵

(1. 云南电力技术有限责任公司, 云南 昆明 650217;

(2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217;

3. 云南电网有限责任公司临沧供电局, 云南 临沧 677000;

4. 云南兆讯科技有限责任公司, 云南 昆明 650217;

5. 昆明昆船智慧机场技术有限公司, 云南 昆明 650220)

摘要:中低压配电系统因铁磁谐振引起的电磁式电压互感器(PT)烧毁、一次消谐器损坏、熔断器熔断等事故频繁发生,严重影响系统的安全稳定运行。为此,通过理论分析并结合现场典型案例,验证了系统单相接地故障、断路器分合闸操作等电磁暂态冲击使PT饱和而产生的饱和电流,是熔断器频繁熔断的主要原因。其次,分析了PT饱和电流的影响因素,试验测试了熔断器耐受PT饱和电流的能力。研究表明:通过增大PT直流电阻、选择伏安特性拐点电压相对较高的圆柱型消谐器和增大熔断器额定电流可降低熔断器熔断概率。最后,给出了PT、消谐器和熔断器选择方面的具体建议,为后续电磁式电压互感器用熔断器频繁熔断问题的解决提供参考。

关键词:电磁式电压互感器;熔断器;频繁熔断

中图分类号:TM45 **文献标识码:**B **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed25555

Analysis and Solutions for Frequent Fuse Tripping in Electromagnetic Voltage Transformers

ZHANG Chunli¹, LIU Hongwen², FANG Pengxing³, CHAI Chenchao⁴, ZHANG Wenqiong⁵

(1. Yunnan Electric Power Technology Co., Ltd., Kunming 650217, Yunnan, China; 2. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, Yunnan, China; 3. Yunnan Power Grid Corporation Lincang Power Supply Bureau, Lincang 677000, Yunnan, China; 4. Yunnan Megasun Technology Co., Ltd., Kunming 650217, Yunnan, China; 5. Kunming KSEC Smart Airport Technology Co., Ltd., Kunming 650220, Yunnan, China)

Abstract: Incidents such as the burning of electromagnetic voltage transformers (PT), damage to primary harmonic suppressors, and fuse tripping occur frequently in low and medium voltage distribution systems due to ferroresonance, severely affecting the safe and stable operation of the system. Therefore, through theoretical analysis and combined with field case studies, it was verified that the saturation current produced by PT saturation due to electromagnetic transient impacts from system single-phase ground faults and circuit breaker operations was the main reason for the frequent fuse tripping. Secondly, the factors influencing the saturation current of PT was analyzed and the capacity of fuses to withstand the PT saturation current was tested. The research indicates that the probability of fuse tripping could be reduced by increasing the PT's DC resistance, choosing cylindrical harmonic suppressors with relatively high knee-point voltages of their volt-ampere characteristics, and increasing the rated current of the fuses. Finally, specific recommendations for the selection of PTs, harmonic suppressors, and fuses were provided, offering reference measures for resolving the issue of frequent fuse tripping in electromagnetic voltage transformers protected by fuses.

Key words: electromagnetic voltage transformers; fuses; frequent tripping

作者简介:张春丽(1989—),女,硕士研究生,工程师,主要研究方向为配电网铁磁谐振防治、接地故障研究,Email:1018834999@qq.com

通讯作者:刘红文(1984—),男,硕士研究生,正高级工程师,主要研究方向为配电网故障保护与定位技术、电气设备绝缘状态监测技术与传感器研究,Email:liuhongwen_19@163.com

配电网承担着分配电能的职能,直接面向终端客户,在电力系统中占据十分重要的地位^[1]。配电网结构复杂,运行环境恶劣,极易发生各类随机故障,其中约70%的配电网故障为单相接地故障^[2-3]。在单相接地故障后,系统仍可运行1~2 h^[4],配电网长时间在有故障的状态下运行,电磁式电压互感器(PT)熔断器会因长时间承受过电压而发生熔断。此外,熔断器熔断常见于该段母线上的馈线发生单相接地故障,保护跳闸后^[5],系统受电磁暂态冲击使电压互感器铁心出现不同程度的饱和,励磁阻抗变小,此时若电压互感器自身的感抗与系统对地电容达到一定的参数条件,就会形成特殊的三相或者单相谐振回路,并能激发起各种谐波的铁磁谐振过电压或过电流^[6-8],使系统中弱绝缘设备对地闪络、PT高压熔断器熔断、消谐器损坏,甚至可造成PT烧毁或爆裂事故,严重影响系统的安全稳定运行^[9-11]。铁磁谐振引起设备损坏照片如图1所示。



(a)熔断器熔断

(b)消谐器损坏

(c)互感器烧毁

图1 设备损坏照片

Fig.1 Photos of damaged equipment

近年来,由铁磁谐振引起的母线PT损坏、熔断器熔断问题频繁发生^[12]。以云南电网某供电局为例,截至2023年10月,同一段母线PT熔断器熔断超两次的变电站多达23座,其中某35 kV变电站10 kV I段母线PT熔断器熔断6次,仅2023年4月就连续熔断4次。2023年,某110 kV变电站35 kV I段母线PT、某35 kV变电站35 kV I段母线PT、某35 kV变电站10 kV母线PT发生损坏,严重困扰着运维人员,影响供电可靠性。

然而,铁磁谐振是电力系统中非线性电感与电容复杂的振荡现象,谐振回路和激发条件多样,其危害程度既取决于谐振过电压、过电流幅值的大小,也取决于持续时间的长短^[13]。国内外学者通过大量的研究提出了多种抑制措施^[14-16],目前广泛应用于电力系统的措施为安装一次消谐器,在PT一次绕组中性点与地之间接入电阻,以增大零序回路阻尼、消耗谐振回路能量来消除铁磁谐振。另有研究表明PT阻尼的大小关系到铁磁谐振激发后能否稳定维持和谐振过电压幅

值的大小^[17]。基于此,本文研究熔断器频繁熔断原因及PT饱和电流影响因素,从PT直流电阻、消谐器和熔断器选择方面提出建议,给出熔断器频繁熔断问题的解决措施。

1 熔断器频繁熔断原因分析

通常电磁暂态冲击使电磁式电压互感器饱和而产生的励磁涌流(饱和电流),是熔断器频繁熔断的主要原因。电磁暂态冲击的产生包括:接地故障发生和消失瞬间、断路器分合闸操作、雷电故障等^[18]。

PT励磁涌流产生原理如图2所示。图中, E_1, E_2, E_3 为三相电源电势; C_0 为线路对地电容; L_1, L_2, L_3 为PT各相励磁电感; R 为PT直流电阻。由图2可知,励磁涌流 I_0 的产生是当配电网遭受电磁暂态冲击时,由于线路对地电容与电磁式电压互感器电感相互作用产生的饱和电流。该电流峰值可达数安培至数十安培,瞬间使熔断器熔断^[19]。

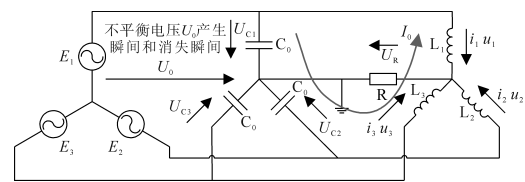


图2 PT励磁涌流产生原理

Fig.2 The principle of excitation surge current generation in PT

为还原PT一次绕组的饱和电流 I_0 ,在10 kV配电网真型平台上测量真实的线路接地故障发生瞬间和消失瞬间流过熔断器的饱和电流,如图3所示。

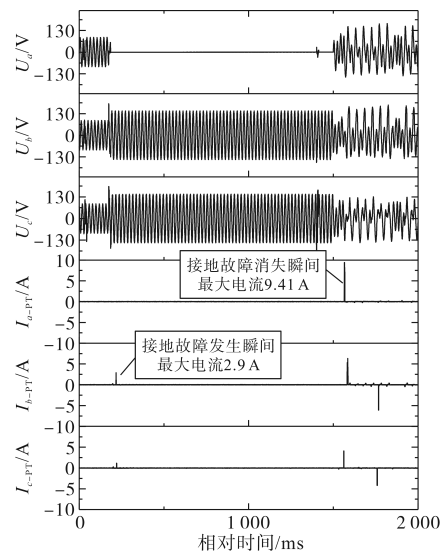


图3 真型平台测试接地故障瞬间PT饱和电流

Fig.3 Instantaneous PT saturated current for ground fault in type-test platform

由图3可知,配电线路A相接地故障发生瞬间PT一次绕组的最大电流为2.9 A,接地故障消失瞬间的最大电流为9.41 A。然而,PT一次熔断器的额定电流仅为0.5 A,如能承受十倍冲击电流,仅为5 A,小于电磁暂态瞬间的饱和电流。

2 PT饱和电流影响因素分析

当10 kV/35 kV系统中性点电压(零序电压)发生突变时,线路的对地电容与电磁式电压互感器的电感将发生串联谐振。图4为串联谐振等效电路图。采用一次消谐器后通常为过阻尼状态,系统不会发生谐振,但由于零序电压存在,因此会产生饱和电流。

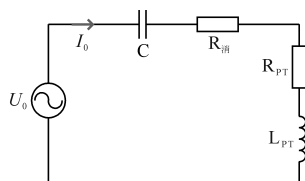


图4 串联谐振等效电路

Fig.4 Series resonant equivalent circuit

图4中,C为等效的线路对地电容, $R_{\text{消}}$ 为消谐器电阻, R_{PT} 为PT直流电阻, L_{PT} 为PT电感。分析在中性点电压 U_0 消失瞬间,PT一次绕组的饱和电流 I_0 的大小。

列写图3的KCL方程为

$$L_{\text{PT}}C \frac{d^2 U_c(t)}{dt^2} + RC \frac{dU_c(t)}{dt} + U_c(t) = U_0 \quad (1)$$

其中

$$R = R_{\text{消}} + R_{\text{PT}}$$

U_0 消失瞬间($U_0=0$)为零输入响应,有:

$$L_{\text{PT}}C \frac{d^2 U_c(t)}{dt^2} + RC \frac{dU_c(t)}{dt} + U_c(t) = 0 \quad (2)$$

式(2)为二阶齐次线性微分方程,其特征方程为

$$L_{\text{PT}}Cp^2 + RCp + 1 = 0 \quad (3)$$

式(3)的特征根为

$$p_{1,2} = \frac{-RC \pm \sqrt{(RC)^2 - 4L_{\text{PT}}C}}{2L_{\text{PT}}C} \quad (4)$$

式(2)依据 p_1 和 p_2 的不同存在三种振荡形式:

1) $(RC)^2 - 4L_{\text{PT}}C > 0$, 即 $R > 2\sqrt{\frac{L_{\text{PT}}}{C}}$, 为过阻

尼状态, p_1 和 p_2 为两个不相等的实根, U_{c0} 为 U_0 消失时分布电容C上的电压,则式(2)的解为

$$U_c(t) = \frac{U_{c0}}{p_2 - p_1} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) \quad (5)$$

则 $I_0(t)$ 为

$$I_0(t) = C \frac{dU_c(t)}{dt} = p_1 p_2 C \frac{U_{c0}}{p_2 - p_1} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \quad (6)$$

由于 $p_1 p_2 = \frac{1}{L_{\text{PT}}C}$, 则

$$I_0(t) = \frac{U_{c0}}{\sqrt{(RC)^2 - 4L_{\text{PT}}C}} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \quad (7)$$

过阻尼状态时, R 越大, $\sqrt{(RC)^2 - 4L_{\text{PT}}C}$ 越大,则饱和电流 $I_0(t)$ 越小。

2) $(RC)^2 - 4L_{\text{PT}}C = 0$, 即 $R = 2\sqrt{\frac{L_{\text{PT}}}{C}}$, 为临界状态, p_1 和 p_2 为两个相等的实根,则式(2)的解为

$$U_c(t) = U_{c0} (1 + \frac{R}{2L_{\text{PT}}} t) e^{-\frac{R}{2L_{\text{PT}}} t} \quad (8)$$

则 $I_0(t)$ 为

$$I_0(t) = C \frac{dU_c(t)}{dt} = -U_{c0} C \frac{R^2}{4L_{\text{PT}}^2} t e^{-\frac{R}{2L_{\text{PT}}} t} \quad (9)$$

由于临界状态时 $R = 2\sqrt{\frac{L_{\text{PT}}}{C}}$, 则

$$I_0(t) = -U_{c0} \frac{1}{L_{\text{PT}}} t e^{-\frac{1}{\sqrt{L_{\text{PT}}C}} t} \quad (10)$$

临界阻尼状态时,饱和电流 $I_0(t)$ 仅与PT的电感 L_{PT} 和线路对地电容 C 有关,饱和电流最大。

3) $(RC)^2 - 4L_{\text{PT}}C < 0$, 即 $R < 2\sqrt{\frac{L_{\text{PT}}}{C}}$, 为欠阻尼状态, p_1 和 p_2 为两个不相等的虚根,则式(2)的解为

$$U_c(t) = \frac{U_{c0}}{p_2 - p_1} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) \quad (11)$$

$$U_c(t) = \frac{U_{c0}}{\sqrt{1 - \frac{R^2 C}{4L_{\text{PT}}}}} e^{\frac{R}{2L_{\text{PT}}} t} \sin \left[\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L_{\text{PT}}^2}} t + \arcsin \left(\sqrt{1 - \frac{R^2 C}{4L_{\text{PT}}}} \right) \right] \quad (12)$$

欠阻尼状态时,饱和电流 $I_0(t)$ 与PT的电感 L_{PT} 、线路对地电容 C 、消谐器电阻 $R_{\text{消}}$ 和PT直流电阻 R_{PT} 有关, R_{PT} 和 $R_{\text{消}}$ 越大,饱和电流越大。

通常电磁式电压互感器加装消谐器后,处于过阻尼状态,PT的饱和拐点电压 $1.9U_n$ 按照国标GB/T 20840.3—2013要求,通常设计相差不大,线路对地电容 C 属于电网参数不能减小,PT直流电阻和消谐器电阻是决定饱和电流的关键参数。增大PT直流电阻和消谐器电阻可降低饱和电流、消除铁磁谐振。

3 现场典型案例

110 kV DJ 变电站 10 kV 母线分别于 2019 年 12 月 12 日、12 月 13 日发生两次 PT 高压熔断器三相熔断。在发生熔断器熔断问题之后,检查 PT 的绝缘电阻、直流电阻等均在正常范围,PT 本体未见异常。DJ 变电站安装了饱和型消谐装置,该装置采用检测 PT 饱和和电流辨识铁磁谐振,并于 5 ms 内快速启动消谐。通过分析该装置数据波形,明确了单相接地消失瞬间的励磁涌流是熔断器频繁熔断的原因。

3.1 工况一

2019 年 12 月 12 日 14 时 19 分 34 秒开始, B 相出现间歇性接地过程, 至 14 时 20 分 20 秒, 期间发生 8 次单相接地, 后三相熔断器熔断, 如图 5 所示。

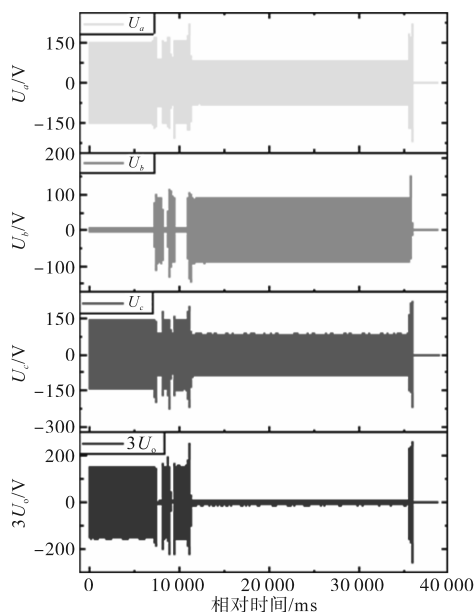


图 5 2019 年 12 月 12 日 14 时 20 分 B 相间歇性接地过程
Fig.5 Phase B intermittent grounding process occurred at 14:20 on December 12, 2019

在此期间,消谐装置动作三次,分别是:14 时 19 分 34 秒 410 毫秒动作一次,14 时 19 分 34 秒 610 毫秒动作一次,14 时 19 分 51 秒 228 毫秒动作一次,如图 6 所示。

2019 年 12 月 12 日消谐装置动作时序如图 7 所示。在 t_1, t_2 时刻,消谐装置动作,检测到 PT 一次绕组的电流分别达到 7.8 A 和 9.6 A。经过 t_2 时间,消谐装置判定系统出现间歇性接地,如未出现稳定的铁磁谐振,消谐装置不再动作; t_2-t_3 约 15 s 之间为稳定的接地,励磁涌流小于整定值 0.5

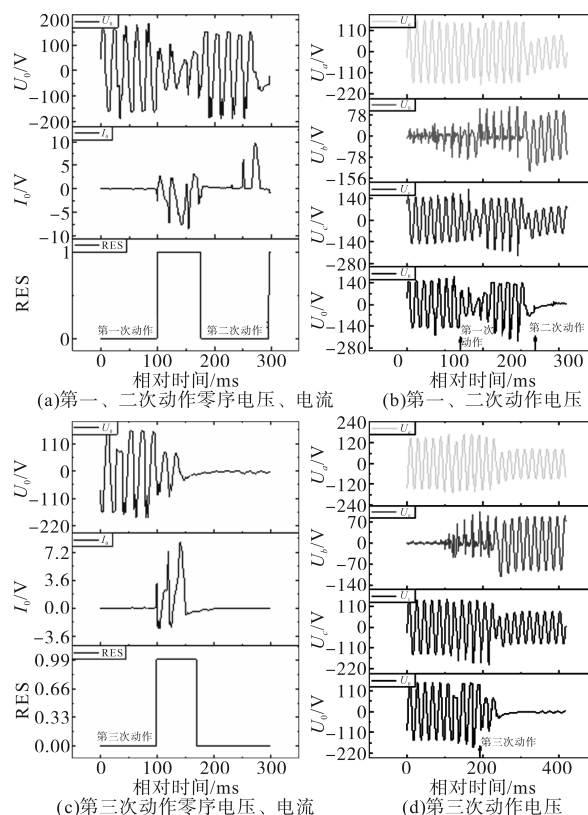


图 6 2019 年 12 月 12 日 14 时 19 分消谐装置动作情况

Fig.6 Operation status of the harmonic elimination device at 14:19 on December 12, 2019

A,消谐装置返回到初始状态; t_3 时刻装置再次动作,达到了装置频繁动作的保护时间 20 s,装置闭锁。在 t_4 时刻接地不稳定时,熔断器熔断。

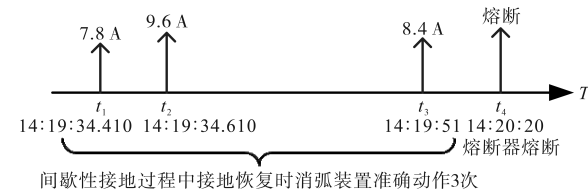


图 7 2019 年 12 月 12 日消谐装置动作时序

Fig.7 Operation sequence of the harmonic elimination device on December 12, 2019

3.2 工况二

2019 年 12 月 13 日 03 时 51 分 25 秒 630 毫秒, B 相接地,至 03 时 51 分 27 秒 250 毫秒, B 相接地恢复。03 时 51 分 27 秒 690 毫秒, B 相再次接地,至 03 时 51 分 36 秒 450 毫秒, B 相接地恢复, A 相熔断器熔断。03 时 51 分 37 秒 335 毫秒, B 相再次接地,至 03 时 51 分 37 秒 840 毫秒时, B 相接地恢复, B, C 两相熔断器熔断,如图 8 所示。

03 时 51 分 26 秒 500 毫秒,因 B 相接地并不稳定, PT 饱和后出现励磁涌流,消谐装置动作。动作期间, PT 零序电流峰值约 2.9 A,如图 9 所示。

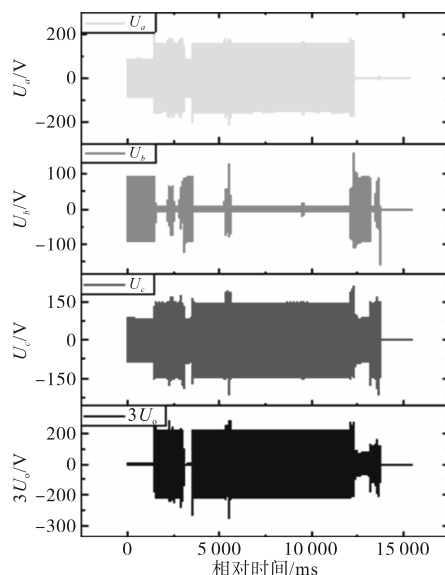


图8 2019年12月13日03时51分B相间隙性接地过程

Fig.8 Intermittent grounding process of phase

B at 03:51 on December 13, 2019

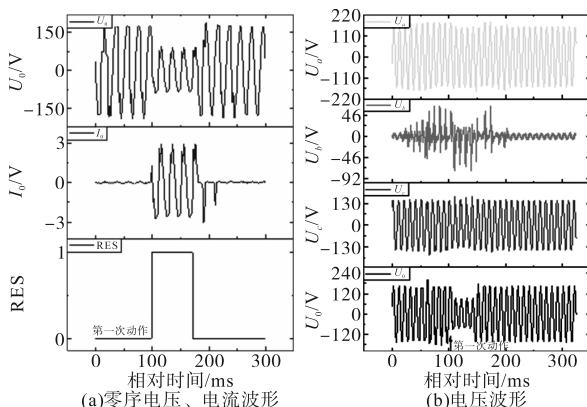


图9 03时51分26秒500毫秒消谐装置动作情况

Fig.9 Operation status of the harmonic elimination

device at 03:51:26.500

03时51分27秒170毫秒,消谐装置再次动作。动作期间,PT零序电流峰值最大为6.6 A,如图10所示。

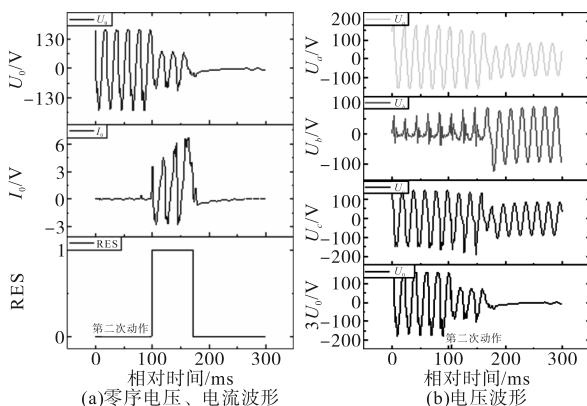


图10 03时51分27秒170毫秒消谐装置动作情况

Fig.10 Operation status of the harmonic elimination

device at 03:51:27.170

2019年12月13日消谐装置动作时序如图11所示。在 t_1, t_2 时刻,消谐装置动作,检测到PT一次绕组的电流分别为2.9 A和6.6 A。经过 t_2 时间,消谐装置判定系统出现间歇性接地,如未出现稳定的铁磁谐振,装置不再动作; t_2-t_3 约10 s时间为间歇性接地过程,消谐装置依其动作逻辑未检测到持续的铁磁谐振而不动作。因间歇性接地中PT一次绕组电流的作用,熔断器在 t_3, t_4 时刻分别熔断。

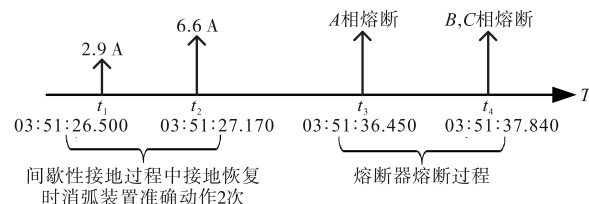


图11 2019年12月13日消谐装置动作时序

Fig.11 Operation sequence of the harmonic elimination

device on December 13, 2019

综上,在单相接地消失瞬间,系统受到电磁暂态冲击,PT饱和和后出现励磁涌流使熔断器发生熔断。

4 熔断器电磁暂态冲击试验

为检验熔断器耐受PT饱和电流的能力,搭建了熔断器电磁暂态冲击试验回路,开展熔断耐受饱和电流试验。图12为熔断器电磁暂态冲击试验电路,图中,T为充电变压器,D为硅堆,r为保护电阻,C为电容器,G为点火球隙,L和R为线路所有元件及回路连线电阻与电感,S为分流器,CRO为示波器,O为试样。

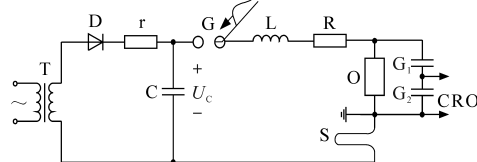


图12 熔断器电磁暂态冲击试验电路

Fig.12 Circuit for the electromagnetic transient impulse test of the fuse

峰值时间:

$$t_m = \sqrt{LC} \quad (13)$$

峰值电流:

$$I_m = u \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-1} = 0.736U/R \quad (14)$$

试验电容器 C 为3 000 μF ,由六个500 μF 的电容并联而成,其额定电压为300 V;电感 L 为20 mH。试验时通过电感和电容调整电流上升沿,

通过充电电压和试样电阻调整电流峰值。

具体试验方法为:从峰值电流 10 A 开始,分别对每个熔断器试样进行冲击试验,逐级 5 A 递增,直至熔断器熔断;之后根据熔断器熔断时的峰值电流,从此峰值电流逐级 5 A 下调,对熔断器进行重复 10 次冲击试验,找到熔断器能够承受 10 次冲击且不熔断的冲击电流。

10 kV/35 kV 熔断器能承受的电磁暂态冲击电流如图 13 所示, I_{10} 为熔断器能承受 10 次冲击且不熔断的最高冲击电流峰值, I 为熔断器瞬时熔断的最大冲击电流峰值。

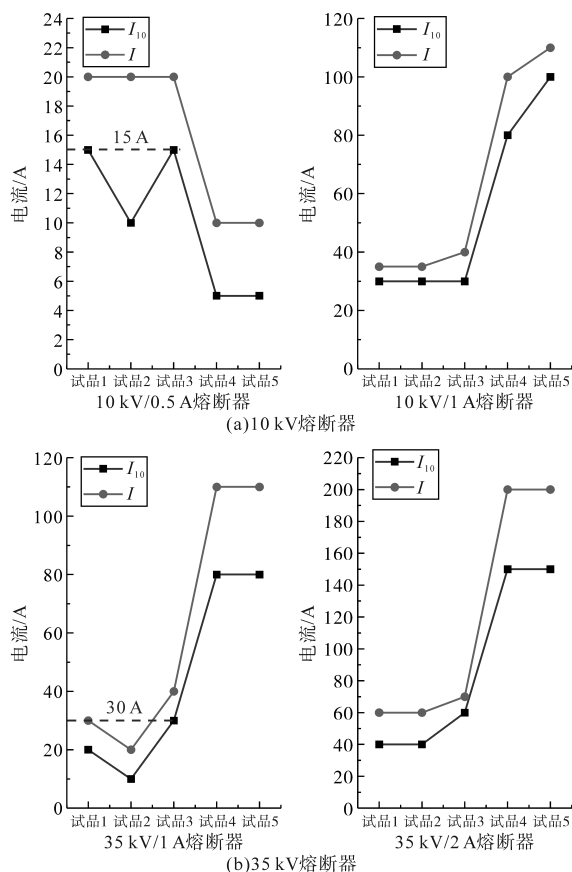


图 13 熔断器能承受的电磁暂态冲击电流

Fig.13 The electromagnetic transient impulse current that the fuse can withstand

从试验结果可以看出,对于 10 kV 熔断器,其多次承受的暂态冲击电流幅值在 15 A 以下的易发生熔断;对于 35 kV 熔断器,其多次承受的暂态冲击电流幅值在 30 A 以下的易发生熔断。

5 解决措施及建议

5.1 解决措施

5.1.1 增大 PT 直流电阻

由于 PT 直流电阻可限制铁磁谐振过电压,那

么互感器直流电阻亦能抑制互感器一次绕组的过电流。统计三组电压互感器在不同对地电容下的互感器一次绕组饱和电流,绘制了互感器直流电阻、系统单相对地电容和互感器饱和电流的关系曲线,如图 14 所示。

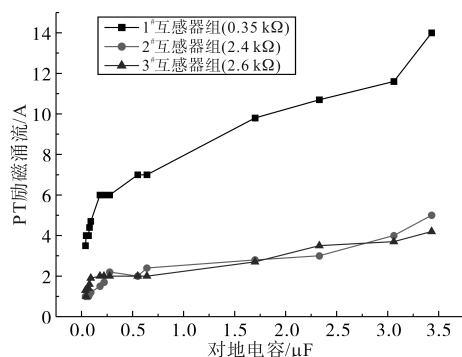


图 14 互感器直流电阻对互感器饱和电流的影响

Fig.14 Influence of the direct current resistance of the transformer on the saturation current of the transformer

由图 14 可知,10 kV 互感器的直流电阻越大,接地故障恢复时刻产生的饱和电流峰值越小,随着电容电流增大,PT 直流电阻为 350 Ω 时,电容电流约为 18 A (对地电容 3.43 μF) 时,饱和电流峰值高达 14 A。

综上,350 Ω 直流电阻 PT 随着电容电流的增大,很容易就达到熔断器熔断电流峰值 14 A。增大 PT 直流电阻,可以抑制 PT 一次绕组的饱和电流,降低熔断器熔断概率。

5.1.2 消谐器伏安 $V-I$ 特性分析

目前有两种类型消谐器,齿轮型通用消谐器、圆柱型消谐器,如图 15 和图 16 所示,其中图 16 所示圆柱型消谐器为带放电管型消谐器。



图 15 齿轮型通用消谐器

Fig.15 Gear-type universal harmonic filter



图 16 圆柱型消谐器

Fig.16 Cylindrical harmonic filter

1) 齿轮型通用消谐器伏安特性。①10 kV 齿轮型消谐器。10 kV 齿轮型消谐器不区分全绝缘型和半绝缘型,为做比较,将其中一只试品(NO.152287)的放电片拆除。根据试验结果绘制了三只10 kV 齿轮型消谐器的伏安特性曲线,如图17所示。从图17可知,10 kV 齿轮型消谐器试品在电压低于某一放电电压以下时,其伏安特性近似一致;在电压超过该放电电压后,由于电压升高,未拆除放电片的消谐器开始放电,其伏安特性发生明显的转折,等效电阻下降。三只试品的放电电压范围在1 700~1 900 V之间,通过消谐器的电流为100~400 mA。

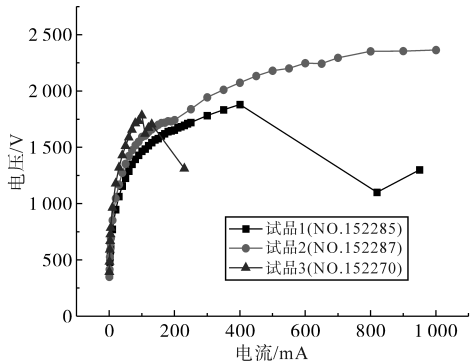


图17 10 kV 齿轮型消谐器交流伏安特性曲线
Fig.17 AC voltage-current characteristic curves of 10 kV gear-type harmonic filter

结合试验数据和图17分析,得到10 kV 齿轮型消谐器伏安特性曲线的转折点,如表1所示。

表1 10 kV 齿轮型消谐器伏安特性曲线转折点

Tab.1 The inflection points of the voltage-current characteristic curve of a 10 kV gear-type harmonic filter			
型号	编号	转折电流/mA	放电电压/V
LXQⅣ-10	NO.152285	100	1 784
LXQⅣ-10	NO.152370	400	1 880
LXQⅣ-10	NO.152287 (拆除放电片)	无	无

②35 kV 齿轮型消谐器。35 kV 齿轮型消谐器不区分全绝缘型和半绝缘型,根据试验结果绘制了三只35 kV 齿轮型消谐器的伏安特性曲线,如图18所示。从图18可知,三只试品在放电之前,伏安特性近似一致。三只试品的放电电压范围在3 200~3 300 V之间,通过消谐器的电流为40~50 mA。虽然由于消谐器开始放电,不稳定的放电造成读数困难,曲线不能平滑、连续,但可以看出,三只试品的等效电阻均出现明显的转折下降。

结合试验数据和图18,得到35 kV 齿轮型消谐器伏安特性曲线的转折点,如表2所示。

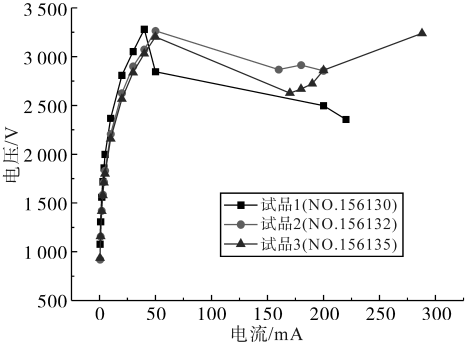


图18 35 kV 齿轮型消谐器交流伏安特性曲线
Fig.18 AC voltage-current characteristic curves of 35 kV gear-type harmonic filter

表2 35 kV 齿轮型消谐器伏安特性曲线转折点

Tab.2 The inflection points of the voltage-current characteristic curve of a 35 kV gear-type harmonic filter

型号	编号	转折电流/mA	放电电压/V
LXQⅣ-35	NO.156130	40	3 281
LXQⅣ-35	NO.156132	50	3 265
LXQⅣ-35	NO.156135	50	3 203

2) 圆柱型消谐器伏安特性。①10 kV 圆柱型消谐器。10 kV 圆柱型消谐器有两种型号,分别用于全绝缘型PT(不带放电管)和半绝缘型PT(带放电管)。根据试验结果绘制了四只10 kV 消谐器的伏安特性曲线,如图19所示。由图19可知,四只试品的伏安特性基本一致,由于半绝缘型PT消谐器没有明显的放电迹象,可以认为,在半绝缘型PT消谐器放电管没有放电前,其伏安特性同全绝缘型PT消谐器是近似一致的。10 kV 半绝缘型消谐器在2 800 V电压下仍无放电现象。

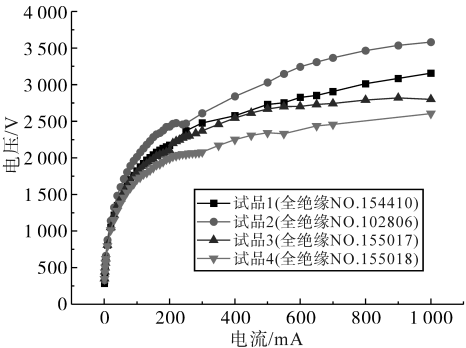


图19 10 kV 圆柱型消谐器交流伏安特性曲线
Fig.19 AC voltage-current characteristic curves of 10 kV cylindrical harmonic filter

②35 kV 圆柱型消谐器。35 kV 圆柱型消谐器有两种型号,分别用于全绝缘型PT(不带放电管)和半绝缘型PT(带放电管)。根据试验结果绘制了四只35 kV 消谐器的伏安特性曲线,如图20所示。由图20可知,四只试品的伏安特性基本一

致,由于半绝缘型PT消谐器没有明显的放电迹象,可以认为,在半绝缘型PT消谐器放电管没有放电前,其伏安特性同全绝缘型PT消谐器是近似一致的。35 kV半绝缘型消谐器在电流达到1 A,电压达到5 700~6 500 V时仍未放电。

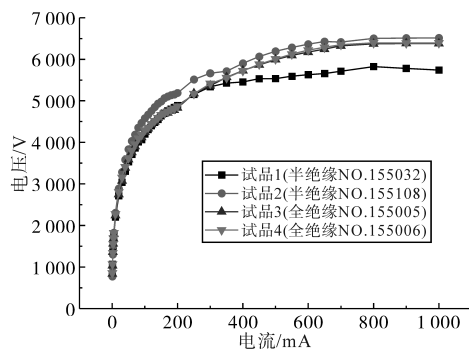


图20 35 kV圆柱型消谐器交流伏安特性曲线
Fig.20 AC voltage-current characteristic curves of 35 kV cylindrical harmonic filter

综上,齿轮型消谐器:10 kV/35 kV 伏安 $V-I$ 特性拐点电压分别在1 700~1 900 V和3 200~3 300 V范围内;圆柱型消谐器:10 kV,35 kV 伏安 $V-I$ 特性拐点电压分别在2 500~2 800 V和5 000~5 700 V范围内,高于齿轮型消谐器。

5.1.3 增大熔断器额定电流

通过稳态电流试验以2 min为标准检测熔断器在哪个电流水平熔断。具体方法为从熔断器额定电流开始施加恒定电流,若2 min之内不断,断开时熔断器将其冷却至常温,之后给熔断器增加0.5 A电流继续试验,如此往复直至熔断器熔断为止,得到不同厂家熔断器2 min内熔断电流及熔断时间,如图21所示。

由图21可知:

1)XRNP1-10 kV/0.5 A,厂家1、厂家2、厂家3和厂家6的2 min耐受电流在同一水平,为2 A,额定电流的4倍,其他厂家均在1.5 A左右;

2)XRNP1-10 kV/1 A,厂家1、厂家2和厂家4的2 min耐受电流在同一水平,为2.5~3 A,其他厂家均在4.5~5.5 A;

3)XRNP1-35 kV/1 A,厂家1、厂家2、厂家4和厂家6的2 min耐受电流在同一水平,为2.5~3 A,其他厂家均在4.5~5.5 A;

4)XRNP1-35 kV/2 A,厂家1、厂家2、厂家4和厂家6的2 min耐受电流在同一水平,为4~5 A,其他厂家均在8.5~11 A。

忽略PT的漏抗,利用直流电阻估算PT二次短路时一次的电流,增大熔断器的额定电流,根

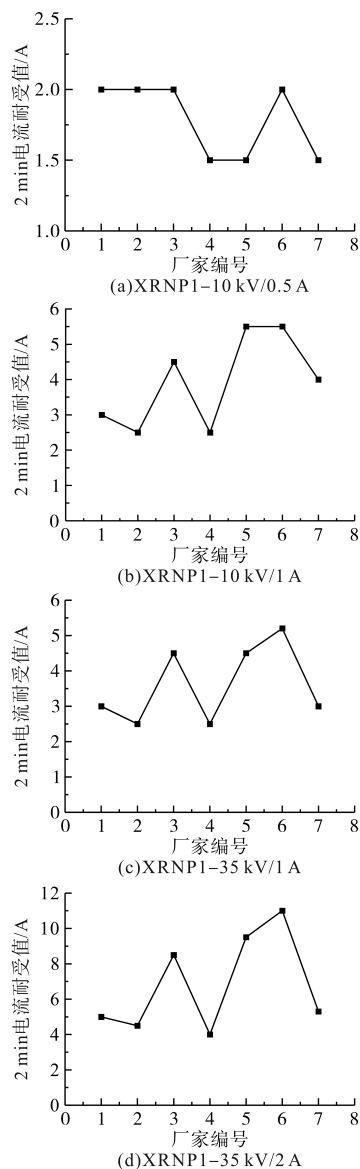


图21 各厂家熔断器2 min耐受电流

据产品实际情况将熔断器更换为1 A或2 A。

综上,增大熔丝的方法可能会降低其对PT的保护功能,但也能减少熔断器熔断的几率,可以通过测试熔断器额定电流确定该平衡点。

5.2 建议

建议准备好备品备件在发生熔断器熔断后,根据如下建议进行随时处理。

1)电磁式电压互感器。①10 kV电磁式电压互感器尽可能选用直流电阻较大的PT,直流电阻大于600 Ω 及以上;②35 kV电磁式电压互感器尽可能选用直流电阻较大的PT,直流电阻大于8 000 Ω 及以上;③安装空间满足要求时,应选用全绝缘电磁式电压互感器。

2)消谐器。①全绝缘电磁式电压互感器选

用全绝缘圆柱型消谐器;②分级绝缘电磁式电压互感器因考虑到N端过电压的影响,分级绝缘PT应选用带放电管的圆柱型消谐器,或采用增大熔断器额定电流的方式。

3)熔断器。①10 kV PT一次直流电阻在600 Ω 以下的,熔断器额定电流采用1 A,600 Ω 以上的可采用0.5 A;②35 kV PT一次直流电阻在8 000 Ω 以下的,熔断器额定电流采用2 A,8 000 Ω 以上的可采用1 A。

6 结论

1)系统单相接地故障、断路器分合闸操作等电磁暂态冲击使电磁式电压互感器饱和而产生的饱和电流,是熔断器频繁熔断的主要原因。理论分析可知,电磁式电压互感器加装消谐器后,系统处于过阻尼状态,PT直流电阻和消谐器电阻是决定该饱和电流的关键参数。

2)PT的直流电阻越大,接地故障恢复时刻产生的饱和电流峰值越小,随着电容电流增大,PT直流电阻为350 Ω 时,电容电流约为18 A时,饱和电流峰值高达14 A。因此,增大PT直流电阻,可以抑制PT一次绕组的饱和电流,降低熔断器熔断概率。建议10 kV电磁式电压互感器直流电阻宜大于600 Ω 及以上,35 kV电磁式电压互感器直流电阻宜大于8 000 Ω 及以上;安装空间满足要求时,应选用全绝缘电磁式电压互感器。

3)10 kV/35 kV圆柱型消谐器伏安特性拐点电压分别在2 500~2 800 V和5 000~5 700 V范围内,高于齿轮型消谐器。建议全绝缘电磁式电压互感器选用全绝缘圆柱型消谐器;分级绝缘电磁式电压互感器选用带放电管的圆柱型消谐器,或采用增大熔断器额定电流的方式。

4)增大熔断器额定电流可减少熔断器熔断几率,但同时也会降低其对PT的保护功能。通过测试熔断器额定电流,建议10 kV PT一次直流电阻在600 Ω 以下的,熔断器额定电流采用1 A,600 Ω 以上的可采用0.5 A;35 kV PT一次直流电阻在8 000 Ω 以下的,熔断器额定电流采用2 A,8 000 Ω 以上的可采用1 A。

参考文献

- [1] 盖志强,薛斌,李雅洁.基于行波理论的多电源配电网故障定位方法[J].电气传动,2022,52(13):68-74.
GAI Zhiqiang, XUE Bin, LI Yajie. Fault location method for

- multi-power distribution network based on traveling wave theory [J]. Electric Drive, 2022, 52(13): 68-74.
- [2] 佟欣,宋国兵,张志华,等.基于对地参数测量的配电网故障选相与有源消弧方法研究[J].电气传动,2023,53(7):56-63.
TONG Xin, SONG Guobing, ZHANG Zhihua, et al. Study on fault phase selection and active arc suppression method in distribution network based on measurement of ground parameters [J]. Electric Drive, 2023, 53(7): 56-63.
- [3] 梁洪湘,曾祥君,喻锴,等.基于有源逆变分相注入的电压消弧与位移电压抑制方法[J].电测与仪表,2022,59(1):51-60.
LIANG Hongxiang, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Voltage arc suppression and displacement voltage suppression method based on active inverter separate phase injection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 51-60.
- [4] 王哲,迟福建,赵志斌,等.基于行波检测的水电配电网单相接地故障定位[J].电气传动,2021,51(16):46-50.
WANG Zhe, CHI Fujian, ZHAO Zhibin, et al. Single-phase ground fault location of hydropower distribution network based on traveling wave detection[J]. Electric Drive, 2021, 51(16): 46-50.
- [5] 吴小科,周江源.10 kV母线电压互感器熔断器熔断故障探讨[J].电工技术,2020(17):95-97.
WU Xiaoke, ZHOU Jiangyuan. Discussion on fusing fault of 10 kV bus voltage transformer fuse[J]. Electric Engineering, 2020 (17): 95-97.
- [6] 黄芳明.电磁式电压互感器熔断器频繁熔断原因分析及治理措施[J].低碳世界,2014(21):94-95.
HUANG Fangming. Analysis and control measures of frequent fuses in electromagnetic voltage transformer circuit[J]. Low Carbon World, 2014(21): 94-95.
- [7] 陈志平,金向朝.10 kV电磁式电压互感器熔断器频繁烧毁事故分析[J].南方电网技术,2009,3(z1):154-157.
CHEN Zhiping, JIN Xiangzhao. Causation analysis and preventions on frequent burning of fuses of 10 kV potential transformer[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(z1): 154-157.
- [8] 余家清,张鑫,王敬国,等.电磁式电压互感器熔断器频繁熔断分析[J].云南电业,2022(7):8-13.
YU Jiaqing, ZHANG Xin, WANG Jingguo, et al. Analysis of frequent fuses blowing in the electromagnetic voltage transformer circuit[J]. Yunnan Electric Power, 2022(7): 8-13.
- [9] 潘婉玉.某高压变电站35 kV母线PT频繁烧毁及炸裂故障分析[J].电工技术,2022(7):105-107.
PAN Wanyu. Analysis of frequent burning and burst failure of 35 kV bus PT in a high voltage substation[J]. Electric Engineering, 2022(7): 105-107.
- [10] 代英俊.35 kV母线电压互感器熔断器熔断故障分析[J].电力安全技术,2021,23(3):38-40.
DAI Yingjun. Analysis on fuse failure of 35 kV bus voltage transformer fuse[J]. Electric Safety Technology, 2021, 23(3):

- 38-40.
- [11] 张志磊,郭涛,田石金,等. 配线路电容与PT电感阻抗比对铁磁谐振电压电流特性的影响研究[J]. 电瓷避雷器,2019(1):71-75,83.
ZHANG Zhilei, GUO Tao, TIAN Shijin, et al. Effects of impedance ratio of line capacitance to PT inductance on ferroresonance voltage and current characteristics in distribution network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(1):71-75,83.
- [12] 姚玉海,朱勇,陈凡,等. 10 kV 配网电压互感器断保险故障分析及应对措施[J]. 电测与仪表,2020,57(2):122-128.
YAO Yuhai, ZHU Yong, CHEN Fan, et al. Fault analysis and countermeasures for fuses blown of 10 kV distribution network PT[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2):122-128.
- [13] 韩涛. 电磁式PT一次侧熔断器熔断原因及防治措施的研究[D]. 保定:华北电力大学,2006.
HAN Tao. Research on the breaking reason and preventive methods of high voltage fuse for potential transformer[D]. Baoding:North China Electric Power University, 2006.
- [14] 王鹏,郭洁,齐兴顺,等. 35 kV 中性点经消弧线圈接地系统几种铁磁谐振消谐措施有效性分析[J]. 电瓷避雷器,2010(6):34-37.
WANG Peng, GUO Jie, QI Xingshun, et al. The effectiveness analysis of ferroresonance suppression measures for 35 kV neutral point through arc suppression coil grounded system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(6):34-37.
- [15] 高一壹. 35 kV 电网PT铁磁谐振过电压防护措施研究[D]. 淄博:山东理工大学,2020.
GAO Yiyi. Research on PT ferromagnetic resonance overvoltage protection measures for 35 kV power grid[D]. Zibo:Shandong University of Technology, 2020.
- [16] 朱保军,咸日常,刘兴华,等. 35 kV PT爆炸事故及其谐振过电压分析和预防[J]. 高压电器,2023,59(1):185-191,197.
ZHU Baojun, XIAN Richang, LIU Xinghua, et al. Explosion accident analysis and prevention of resonance overvoltage of 35 kV potential transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1):185-191,197.
- [17] 刘红文. 配电网铁磁谐振原理及防护[M]. 北京:科学出版社,2019.
LIU Hongwen. Principle and protection of iron core resonance in distribution networks[M]. Beijing:Science Press, 2019.
- [18] 汪伟,汲胜昌,李彦明,等. 电压互感器饱和引起铁磁谐振过电压的定性分析与仿真验证[J]. 变压器,2009,46(2):30-33.
WANG Wei, JI Shengchang, LI Yanming, et al. Qualitative analysis and simulation verification of ferroresonant overvoltage caused by PT saturation[J]. Transformer, 2009, 46(2):30-33.
- [19] 赵梦雅,梁志瑞. 配电网TV高压熔断器熔断影响因素的分析[J]. 电测与仪表,2016,53(21):76-81.
ZHAO Mengya, LIANG Zhirui. The analysis on the influence factors of TV fuses blowing in the distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(21):76-81.

收稿日期:2023-12-15

修改稿日期:2024-02-18

(上接第69页)

- 究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2017.
ZHENG Zhihua. Research on the power of wind farm based on multi-level STATCOM/BESS coordinated control[D]. Harbin:Northeast Agricultural University, 2017.
- [18] 吕志鹏,盛万兴,钟庆昌,等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2591-2603.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its application in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16):2591-2603.
- [19] 王红星,郭敬梅,谢志文,等. 海上风电次/超同步振荡的网侧附加阻尼抑制方法[J]. 南方电网技术,2021,15(11):49-55.
WANG Hongxing, GUO Jingmei, XIE Zhiwen, et al. Grid-side supplementary damping suppression method of sub- & super-synchronous oscillation in offshore wind farms[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(11):49-55.
- [20] 胡文强,吴在军,孙充勃,等. 基于VSG的储能系统并网逆变器建模与参数整定方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):13-23.
HU Wenqiang, WU Zaijun, SUN Chongbo, et al. Modeling and parameter setting method of grid-connected inverter for energy storage system based on VSG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8):13-23.

收稿日期:2024-03-12

修改稿日期:2024-05-06