

# 基于额定电压因数的长电缆线路 PT 保护措施

孙建明<sup>1</sup>, 黄事成<sup>2</sup>, 丁坚勇<sup>2</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 高铁长距离电力线路已逐步实现全电缆化, 而部分高铁供电系统仍采用小电流接地方式。因此, 当系统单相接地时常伴随着间歇性电弧接地现象, 造成了部分电压互感器(PT)的损坏。为解决长电缆线路 PT 损毁现象, 在不改变中性点接地方式和线路结构的前提下, 分析高铁长电缆线路 PT 烧损的主要原因; 通过构建仿真模型, 指出铁路长距离电缆线路小电流接地系统除应按照不接地系统进行电气设备选型及绝缘配合设计外, 宜选用励磁特性饱和点较高的电磁式 PT, PT 额定电压因数宜大于 2.2 p. u.; 并将该方案应用在以无锡东为例的多个高铁长电缆线路配电所内, 均取得良好效果, 验证了该方案的可行性。

**关键词:** 全电缆; 不接地系统; 间歇性接地; PT; 额定电压因数

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.01.023 中图分类号: TM451 文章编号: 1673-9140(2021)01-0199-07

## Research on PT protection measures for long cable lines based on rated voltage factor

SUN Jianmin<sup>1</sup>, HUANG Shicheng<sup>2</sup>, DING Jianyong<sup>3</sup>

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** High-speed rail long-distance power lines have gradually realized full cable, and some high-speed rail power systems still use neutral point ungrounding. Therefore, when the system is single-phase grounded, it is often accompanied by intermittent arc grounding, which causes damage to some PTs. In order to solve the PT damage phenomenon of long cable line, the main reason of the PT burnout of high-speed long cable line is obtained through theoretical analysis without changing the grounding mode and line structure of the neutral point. Then, by constructing the simulation model, the railway is pointed out. In the long-distance cable line, the neutral point ungrounded system should be designed according to the ungrounded system for electrical equipment selection and insulation coordination. The electromagnetic PT with higher excitation point saturation should be selected. The PT rated voltage factor should be greater than 2.2 pu; The scheme is applied to a number of high-length cable-length cable distribution stations in Wuxi East, and good results have been obtained, which verifies the feasibility of the scheme.

**Key words:** full cable; ungrounded system; intermittent grounding; PT; rated voltage factor

长期以来中国 10 kV 架空线路中性点一般采用小电流接地系统。小电流接地系统是指中性点不接地或经过消弧线圈和高阻抗接地的三相系统,其共同特征是:当某一相发生接地故障时,由于不能构成短路回路,接地电流是分布电容电流,数值比负荷电流小很多,三相之间的线电压仍保持对称,所以允许系统内的设备短时运行 1~2 h 而不必跳闸。随着中国高速铁路电力贯通线电缆化率的不断提高<sup>[1]</sup>,显著加大了电力供电系统对地电容电流,并且大部分高铁配电所主母线中性点接地方式与上级地方变电站 10 kV 中性点接地方式相同,仍采用小电流接地系统<sup>[2]</sup>。当系统发生单相接地故障时,接地点的电容电流可能会大到难以自行熄灭程度,从而引发电缆线路间歇电弧接地过电压,导致电压互感器(potential transformer, PT)等设备烧毁<sup>[3-4]</sup>。

目前国内外小电流接地系统 PT 的保护研究<sup>[5-9]</sup>主要针对于架空线路,认为架空线路中损毁 PT 的主要原因是铁磁谐振,并提出了许多相应的抑制措施<sup>[10-13]</sup>。但对由长电缆线路组成的小电流接地系统 PT 保护措施研究较少,因此亟需对高铁由长电缆线路构成的供电系统 PT 损毁原因和保护进行研究。

## 1 间歇性电弧接地下 PT 损坏原因

当 PT 长电缆线路单相接地故障时,根据文献<sup>[14]</sup>推导出正常相线路的电压表达式为

$$U(t) = E_m [\sin(\omega t + \varphi) - \sqrt{\cos^2 \varphi + \left(\frac{\omega'}{\omega}\right)^2 \sin^2 \varphi} \sin(\omega' t + \varphi') e^{-\delta t}] \quad (1)$$

式中  $\varphi' = \cos^{-1} \frac{\cos \varphi}{\sqrt{\cos^2 \varphi + \left(\frac{\omega'}{\omega}\right)^2 \sin^2 \varphi}}$ ;  $\omega' =$

$1/\sqrt{L_{PT}C_0}$  为并联电路的自由振荡时的角频率,  $\delta$  为阻尼系数。

根据式(1)可以得知,由于  $\omega' = 1/\sqrt{L_{PT}C_0}$ ,当电缆线路越长,总对地电容就越大,因此  $\omega'$  越小,就使得故障恢复时的冲击电压越大,进而造成 PT 饱和并产生冲击电流,这种冲击电流会对 PT 造成损

害。而间歇性的接地故障相当于这一过程反复的叠加在 PT 上,那么反复的冲击就极有可能造成 PT 发热损毁。然而,当线路长度增加到一定值时,故障点的接地电流逐渐由间歇性接地转变为稳定接地,因此对 PT 的冲击将会减小。

因此,高铁长电缆线路小电流接地系统 PT 烧损的原因除了铁磁谐振以外,还应包括间歇性的电弧接地下电容放电的冲击。在校验 PT 的热稳定性时,应采用间歇性接地故障时所产生的电流来选型。

## 2 PT 额定电压因数与饱和特性

PT 额定电压因数定义是 PT 在规定时间内能满足其热性能和准确等级的最大电压与额定一次电压的比值。该参数与系统最高电压及接地方式有关,在小电流接地系统中,该因数一般不超过 1.5 p. u. 或 1.9 p. u., 高铁长电缆线路目前采用的 PT 额定电压因数一般在 1.9 p. u. 以内。由于 PT 铁芯的饱和特性,在其励磁特性曲线中存在一个拐点,其定义为:当施加的电流值增加为 50%,而励磁出电压增加不大于 10%,则该点就为励磁特性的拐点。并且 PT 额定电压因数应低于拐点所对应的电压值。

为了保护 PT,通常可以采用励磁特性较好的 PT,而提高额定电压因数就是改善 PT 的励磁特性,励磁特性好的 PT 将会使得谐振条件难以达成。这样就起到了抑制谐振、减小过渡中的冲击电流保护 PT 的作用。图 1 为 PT 励磁特性曲线,图中  $l$  为提高性能前的励磁特性曲线,  $l'$  为提高 PT 性能后的励磁特性曲线。

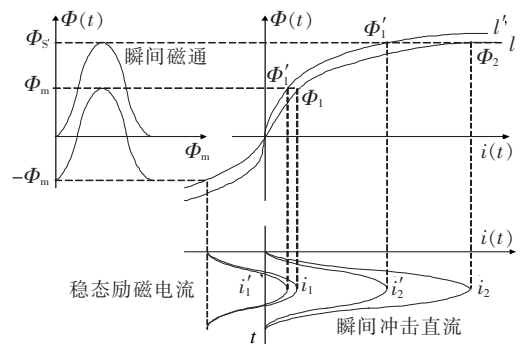


图 1 PT 励磁特性曲线

Figure 1 PT excitation characteristic curve

$\Phi_m$  为稳态时磁通最大值,该磁通的最大值在磁化曲线对应点为  $\Phi_1$  和  $\Phi'_1$ ,所产生的瞬时电流为  $i_1$  和  $i'_1$ 。 $\Phi_s$  为瞬间磁通最大值,该磁通的最大值在磁化曲线对应点为  $\Phi_2$  和  $\Phi'_2$ ,所产生的瞬时电流为  $i_2$  和  $i'_2$ 。

对同一磁通,曲线  $l'$  所对应的冲击电流小于  $l$  所对应的冲击电流,通过采用更高额定电压因数的 PT 可以避免 PT 的烧毁。虽然提高 PT 的额定电压因数可以较好解决 PT 烧毁这一问题,但是高额定电压因数的 PT 不仅难以制作而且成本很高,因此需要探究最适宜的额定电压因数。

### 3 PT 额定电压因数的选取

#### 3.1 PT 励磁特性曲线

为确定在保证 PT 安全前提下的最低额定电压因数,该文采用 1.9、2.1、2.2 及 2.3 p. u. 4 种不同额定电压因数的 PT 进行实验<sup>[14]</sup>。其饱和特性曲线如图 2 所示。

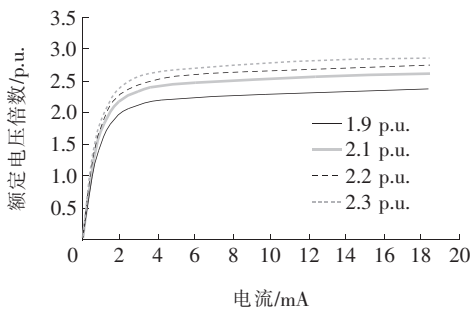


图 2 不同额定电压因数的励磁特性曲线

Figure 2 Excitation characteristic curve of different rated voltage factors

从图 2 中可知,PT 的  $U/I$  曲线为一条非线性曲线,当 PT 的电压较低时,其  $U/I$  曲线呈线性关系;而当电压超过某一值(拐点)时, $U/I$  曲线呈非线性关系,并且额定电压因数越大,其拐点所对应的电压就越高。

#### 3.2 架空线路间歇性接地对 PT 的影响

仿真长距离架空线路间歇性接地对 PT 的影响。仿真采用的架空线路参数:零序电阻  $0.23 \Omega/\text{km}$ ,零序电感为  $1.1 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$ ,零序电容为  $3.8 \times 10^{-8} \text{ F}/\text{km}$ ,正序电阻为  $0.17 \Omega/\text{km}$ ,正序电感为  $7.6 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$ ,正序电容为  $6.1 \times 10^{-8} \text{ F}/\text{km}$ ;架空

线路采用 70、140 km 2 种长度;仿真时所选取的 PT 额定电压因数为 1.9 p. u.;假定 70 km 架空线路在 0.1 s 时发生接地故障,0.5 s 时故障消失,140 km 系统发生接地故障及故障消失的时间段为  $[0.2, 0.3]$ 、 $[0.4, 0.5]$ 、 $[0.6, 0.7]$ 、 $[0.8, 1]$ 。

图 3 为 70 km 架空线路单相接地时 PT 的电流和瞬时功率。从图 3 中可以看出,对于稳态接地,对地电容不存在冲击,加在 PT 上的功率并不高,其最大瞬时功率为  $10 \text{ V} \cdot \text{A}$ 。由于这个数值较低,因此 PT 不受接地影响。

图 4 为 140 km 架空线路发生单相接地情况下的瞬时功率。由于系统发生了间歇性的接地故障,虽然稳态值并不大,但是此时瞬时功率对 PT 的冲击远远大于 70 km 时的冲击。从图 4 可以看出,PT 的最大瞬时功率出现在第 2 次接地时,此时瞬时功率达到  $150 \text{ V} \cdot \text{A}$ 。虽然瞬时值较大,但是由于 PT 的极限功率为  $300 \text{ V} \cdot \text{A}$ ,因此 PT 仍能承受。所以对于架空线路采用 1.9 p. u. 的 PT 即使在发生间歇性接地故障时,仍然可以不被烧毁,实际情况与仿真情况一致。

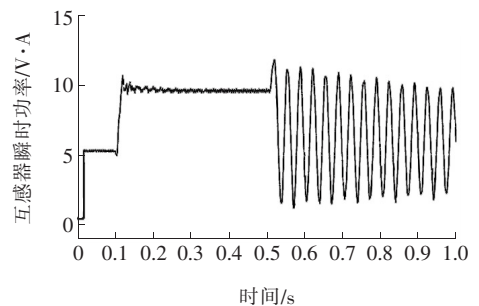


图 3 70 km 架空线路单相接地时 PT 的瞬时功率

Figure 3 Instantaneous power of PT in 70 km overhead line with single phase grounding

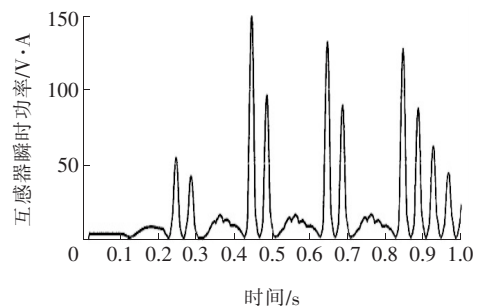


图 4 140 km 架空线路单相接地时 PT 的瞬时功率

Figure 4 Instantaneous power of PT in 140 km overhead line with single phase grounding

### 3.3 长电缆线路间歇性接地对 PT 的影响

分析长电缆线路发生间歇性接地对 PT 的影响。仿真中采用的电缆单位长度电阻为  $0.06 \Omega/\text{km}$ , 电抗为  $0.28 \text{ mH}/\text{km}$ , 单位电容为  $0.2 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

根据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014 中 10 kV 交联聚乙烯电缆单相接地间歇性电弧电流下限为 10 A, 所以, 当电缆线路长度较短时, 其产生的接地电容电流不超过 10 A 时, 可以自行熄灭, 而当线路长度逐渐增加时, 系统接地电流逐渐增大, 就会产生间歇的接地电弧, 此时线路长度对 PT 的发热影响远大于其它因素。如果线路进一步加长, 间歇性的电弧将会变成稳定的弧光接地, 此时对 PT 的冲击比间歇性接地时要小。通过仿真得出 1.9 p. u. 时 PT 在不同线路长度下单相接地时的过电流和瞬时功率, 如表 1 所示。

表 1 线路长度对 PT 瞬时功率的影响

Table 1 Influence of line length on PT instantaneous power

S/km	P/(V·A)	S/km	P/(V·A)
10	380	40	370
20	455	50	345
30	550		

从表 1 可见, 当系统发生间歇性接地故障时, 对 PT 的冲击极大, 瞬时功率可以达到  $550 \text{ V} \cdot \text{A}$ , 远远超过 PT 所能承受的  $300 \text{ V} \cdot \text{A}$ 。另外即使系统没有发生间歇性接地故障, PT 所承受的瞬时功率也非常可观, 长时间的接地故障也可能烧毁 PT。

### 3.4 长电缆线路 PT 额定电压因数的选取

由上分析可知, 1.9 p. u. 时 PT 承受不了长电缆线路单相接地故障产生瞬时功率的冲击。因此为了防止 PT 的烧毁, 可以通过采用提高 PT 额定电压因数的措施。

通过仿真可以得出额定电压因数为 1.9、2.1、2.2、2.3 p. u. 时, PT 瞬时功率如图 5 所示。

图中横坐标为电缆线路长度, 单位为 km; 纵坐标为单相间歇性接地故障的瞬时功率, 单位为  $\text{V} \cdot \text{A}$ , 虚线将图分成 A、B、C 3 个区域。在区域 A 中, 由于线路较短, 故障时零序电流小, 不能产生电弧, 此时加在 PT 上的瞬时功率相对较小, 一般在  $400 \text{ V} \cdot \text{A}$  以内; 在区域 B 中, 由于线路相对较长, 产生间歇性的电弧, 此时加在 PT 上的瞬时功率远大于

PT 的极限功率; 在 C 区域中, 由于线路较长, 故障点能产生稳定的电弧, 此时加在 PT 上的瞬时功率比 B 区域的瞬时功率要小。

根据图 5 的仿真情况, 该文选取最为严重的情况进行仿真, 此时电缆线路大概在 30 km 附近。图 6 为不同额定电压因数的 PT 在产生间歇性电弧接地时的瞬时功率。从图中可以得知, 在系统发生间

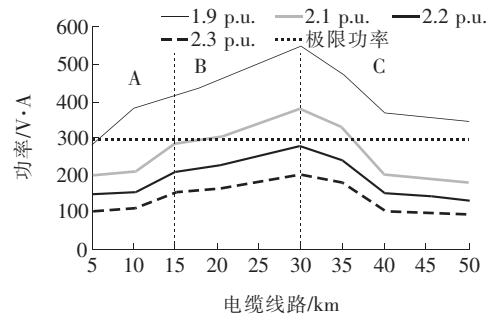
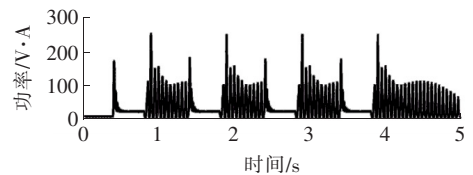
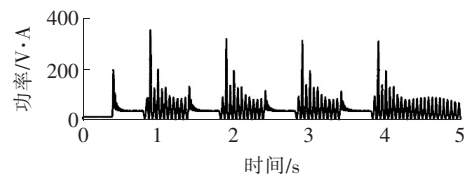


图 5 不同额定电压因数 PT 对应的瞬时功率

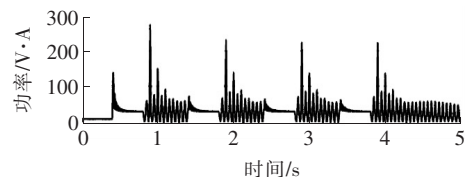
Figure 5 Instantaneous power corresponding to different rated voltage factor PT



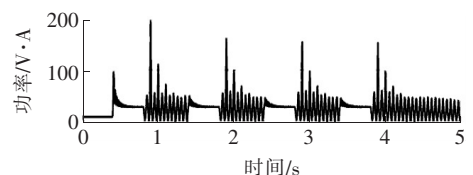
(a) 1.9 p.u. 情况下 PT 的瞬时功率



(b) 2.1 p.u. 情况下 PT 的瞬时功率



(c) 2.2 p.u. 情况下 PT 的瞬时功率



(d) 2.3 p.u. 情况下 PT 的瞬时功率

图 6 不同额定电压因数 PT 对应的电流和功率

Figure 6 Current and power corresponding to different rated voltage factor PT

歇性接地时,1.9 p. u. PT 的瞬时功率为  $550 \text{ V} \cdot \text{A}$ ,此时 PT 无法承受短路时瞬时功率的冲击;当把额定电压因数提升到 2.1 p. u. 时,此时电压器 PT 的瞬时功率为  $360 \text{ V} \cdot \text{A}$ ,虽然可以承受住一般的冲击,但是仍然承受不了间歇性接地时的冲击;当额定电压因数为 2.2 p. u. 时,即使当系统出现间歇形性的接地故障,由于 PT 的性能较好,瞬时功率也控制在  $300 \text{ V} \cdot \text{A}$  以内,该等级的 PT 可以承受间歇性的接地故障;当额定电压因数为 2.3 p. u. 的波形时,此时冲击对 PT 影响则更小。因此从仿真结果看,将 PT 的额定电压因数提高到 2.2 p. u. 以上能较好地防止 PT 烧毁。

### 4 高铁配电所 PT 故障案例分析

以京沪高铁无锡东配电所接入系统为例进行分析。该系统上级变电站 10 kV 中性点为消弧线圈接地方式,消弧线圈接地方式属于小电流接地的一种情况,该系统结构如图 7 所示。

图 7 的团结线为从市电引出的高铁配电所电源线。电源电缆线路长度约 8 km,出线长度在 30 km 左右。由于市电侧的消弧线圈在补偿时未考虑铁路的对地零序电流,因此该系统始终处于一个欠补偿状态。10 kV 主母线 PT 原采用半绝缘 PT,额定电压因数为 1.9 p. u.,曾经 4 次发生 10 kV 母线 PT 烧损事故。2011 年 3 月 28 日供电电源母线的相邻鞋山线发生单相接地故障时,导致团结线出线无锡

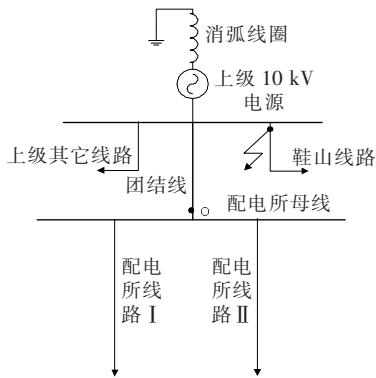


图 7 无锡东配电所结构

Figure 7 Structure of Wuxi East power distribution station

东 10 kV 配电所母线 PT 再次烧毁。其故障过程如图 8 所示。

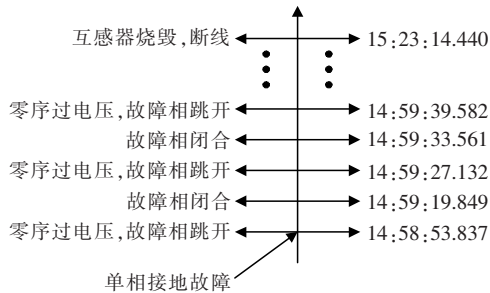


图 8 鞋山线故障过程记录

Figure 8 Fault process record of Xieshan line

仿真采用无锡东实际的线路结构和参数。PT 可以采用 Matlab 提供的可饱和变压器模块来对 PT 进行模拟仿真。其饱和曲线可以人为整定,并能准确地模拟 PT 铁芯的饱和。可饱和 PT 模块如图 9 所示。

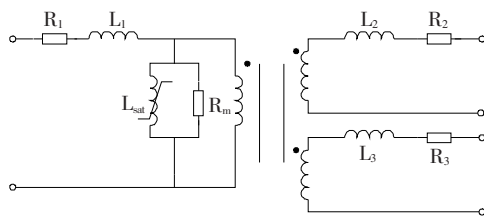


图 9 可饱和 PT 模块示意

Figure 9 Schematic diagram of saturable PT module

配电所 PT 设计采用 1.9 p. u.。将 PT 按照 1.9 p. u. 进行设置,并且分别设置电弧起始和结束时刻。设起弧和熄弧的起始时间为  $[0.4, 0.5]$ 、 $[0.8, 1.4]$ 、 $[1.8, 2.4]$ 、 $[2.8, 3.4]$ 、 $[3.8, 5.0]$ 。从仿真中可以得知 PT 的瞬时功率如图 10 所示。

当无锡东线路发生间歇性短路的情况时会在 PT 上产生很大的瞬时功率,从图 10 得知,在第一次短路时的瞬时功率达到  $320 \text{ V} \cdot \text{A}$ ,已经超过 PT 的最大允许值,而之后的冲击值更大,达到  $600 \text{ V} \cdot \text{A}$ ,因此 1.9 p. u. PT 极易烧毁。这和无锡东 PT 烧毁过程完全一致。

若将 PT 的额定电压因数换成 2.2 倍,则其仿真结果如图 11 所示。改进后的 2.2 p. u. PT 的最大瞬时功率为  $280 \text{ V} \cdot \text{A}$ ,低于 PT 的最大允许值,可知提高 PT 额定电压因数可以大大降低 PT 的瞬时功率,因此可以避免烧毁 PT。

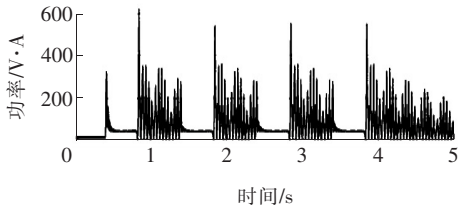


图 10 短路时 1.9 p. u. PT 的瞬时功率

Figure 10 Instantaneous power of 1.9 p. u. PT in short circuit

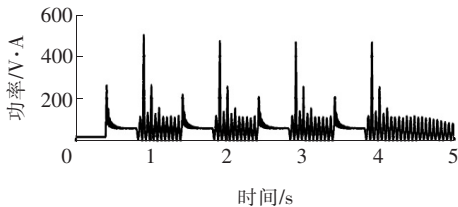


图 11 短路时 2.2 p. u. PT 的瞬时功率

Figure 11 Instantaneous power of 2.2 p. u. PT in short circuit

根据以上分析,无锡东配电所自 2011 年 11 月 23 日更换 10 kV 母线 PT,采用半绝缘 N 端加强型 PT,电压因数从 1.9 p. u. 提高到 2.5 p. u.,此后主母线 PT 一直运行正常。在京沪高速铁路蚌埠东站及昌吉赣铁路泰和配电所 PT 烧坏后,也据此将 PT 电压因数从 1.9 p. u. 提高到 2.5 p. u.,亦未再发生 PT 烧损事故。

## 5 结语

铁路长距离电缆小电流接地系统 PT 烧损的主要原因是铁磁谐振下间歇性的电弧接地过电压冲击,除应按照不接地系统进行过电压保护及绝缘配合设计外,宜选用励磁特性饱和点较高的电磁式 PT,其额定电压因数宜大于 2.2 p. u.。

### 参考文献:

[1] 张博文,陈劲草,杨坤松,等. 高速铁路电力贯通线路并网倒闸条件的研究[J]. 铁道学报,2014,36(6):21-26.  
ZHANG Bowen, CHEN Jincan, YANG Kunsong, et al. Research on distribution network connection and breaker switch of power transfixion line of the high-speed

railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(6):21-26.

- [2] 孙建明. 贯通线全电缆线路中性点接地方式的选择[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(6):87-90+108.  
SUN Jianming. Choice of neutral point earthing mode of 10 kV all-cable power transmission line for high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(6):87-90+108.
- [3] 李瑞,刘建华,肖世辉. 配电所高压柜电压互感器损坏原因分析及整改措施[J]. 现代城市轨道交通, 2018(6):24-28.  
LI Rui, LIU Jianhua, XIAO Shihui. Analysis and measures on PT damage in GIS high voltage cabinet in distribution substation[J]. Modern Urban Transit, 2018(6):24-28.
- [4] 刘红文,王科,马仪,等. 配电网半绝缘电磁式 PT 加装消谐器后损坏原因分析研究[J]. 变压器, 2015, 52(9):57-60.  
LIU Hongwen, WANG Ke, MA Yi, et al. Damage reason analysis and research of semi-insulating PT in distribution system after installation of harmonic elimination device[J]. Transformer, 2015, 52(9):57-60.
- [5] 吴建辉,刘伟,康国庆,等. 基于波形相似度的配网小电流接地故障选线技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(8):38-42+49.  
WU Jianhui, LIU Wei, KANG Guoqing, et al. Research on line selection technology of distribution network with small current and ground fault based on waveform similarity[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(8):38-42+49.
- [6] 牛勃,吴旭涛,张国勇,等. 一起系统间歇性接地导致电磁式电压互感器的分析及改进措施[J]. 高压电器, 2020, 56(10):70-74+83.  
NIU Bo, WU Xutao, ZHANG Guoyong, et al. Analysis and improvement measures of inductive voltage transformer fault caused by intermittent grounding[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10):70-74+83.
- [7] 李禹鹏,冯煜尧,冯楠,等. 基于戴维南等值和支路传输功率极限的电压稳定评估方法[J]. 智慧电力, 2019, 47(1):13-18+40.

- LI Yupeng, FENG Yuyao, FENG Nan, et al. Evaluation method for voltage stability based on thevenin equivalent and power transfer limit of branch[J]. Smart Power, 2019, 47(1):13-18+40.
- [8] 徐玉琴,张婧婷,边华跃. 复杂配电网系统单相接地故障选线算法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(1):22-27.
- XU Yuqin, ZHANG Jingting, BIAN Huayue. An algorithm for earth fault line selection in complex distribution network system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(1):22-27.
- [9] 李宏博,李培,徐文琪,等. 青海电网高海拔地区电磁式电压互感器烧毁原因分析与解决措施[J]. 国网技术学院学报, 2017, 20(6):7-10.
- LI Hongbo, LI Pei, XU Wenqi, et al. Cause analysis about burning of electromagnetic voltage transformer in high altitude localities and measures for Qinghai power network[J]. Journal of State Grid Technology College, 2017, 20(6):7-10.
- [10] Huang S J, Hsieh C H. Relation analysis for ferroresonance of bus potential transformer and circuit breaker grading capacitance[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 51:61-70.
- [11] 曹良丰,彭杰,周力行,等. 基于IGBT的配电网铁磁谐振抑制装置[J]. 电力学报, 2014, 29(1):32-35.
- CAO Liangfeng, PENG Jie, ZHOU Lixing, et al. Distribution network ferroresonance elimination device based on IGBT[J]. Journal of Electric Power, 2014, 29(1):32-35.
- [12] 王东东,田铭兴,张慧英. 电磁式电压互感器励磁特性对铁磁混沌电路的影响分析[J]. 中国电力, 2019, 52(5):70-75+112.
- WANG Dongdong, TIAN Mingxing, ZHANG Huiying. The effect of excitation characteristics of electromagnetic voltage transformer on ferromagnetic chaotic circuit[J]. Electric Power, 2019, 52(5):70-75+112.
- [13] 齐郑,李鸿毅. 孤岛模式下的微网多PT铁磁谐振的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22):52-58.
- QI Zheng, LI Hongyi. Research on multi-PT ferroresonance in island microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22):52-58.
- [14] 何月. 配网PT损坏机理及其影响因素研究[D]. 重庆:重庆大学, 2014.