

预防 10 kV 系统电压无功控制 装置故障策略研究

苏文博¹, 孙士民², 刘娟³, 潘向华⁴

(1. 山东电力研究院, 山东 济南 250002; 2. 济南迪生电子有限公司, 山东 济南 250400;
3. 华北电力调度局, 北京 100053; 4. 山东电力超高压公司, 山东 济南 250021)

摘要: 对变电站 10 kV 系统电压无功控制装置运行的特点、出现的故障类型, 以及避免故障的防范措施进行了深入研究。针对补偿电容器投入时的涌流与谐振、运行中的爆炸、切除后的剩余电压等问题, 分别采用了按电容器组接线的电压平衡保护、串联电抗器、并联平衡放电线圈等技术; 为满足电压的实时控制与无功跟踪补偿, 采用了变电站运行方式的自识别、专用开关的分散控制技术。变电站电压的综合控制与无功补偿、系统的谐振过电压与电容器的剩余电压、保护的可靠性与灵敏度、电容器的分组与循环投切等难题得到彻底解决。避免故障的防范措施与电压无功控制的效果, 在 20 余座变电站 3 年的运行中得到验证。

关键词: 变电站; 无功电压控制; 故障分析处理技术

中图分类号: TM 761⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)04-0035-04

针对变电站 10 kV 无功补偿装置运行特点、故障类型及补偿设备存在的缺陷, 在 DS1、DS2 型基础上研制了新一代 DS3 型变电站 10 kV 系统电压与无功综合控制装置, 新装置彻底解决了多年来设备运行过程中出现的几种技术问题^[1-2]。下面就电容器组的故障特点、相应的保护原理, 高压电容器断开后放电电压互感器(TV)的作用原理, 装置按负荷变化进行调整、开关机构循环投切原理等问题进行分析。

1 按电容器组接线的电压平衡保护, 解决了电容器爆炸问题

1.1 并联电容器的异常现象与故障^[3]

a. 电容器渗漏油。并联电容器渗漏油主要是产品质量不良、运行维护不当或长期运行缺乏维修致使外皮生锈腐蚀等引起的。

b. 电容器温度过高。电容器温升高影响电容器寿命, 也可能导致电容器的绝缘击穿。温度过高主要原因是电容器过电流及通风条件差, 过电流则是电容器长时期过电压运行或整流装置产生的高次谐波引起的。此外, 电容器内部元件故障, 介质老化、介质损耗、 $\tan \delta$ 增大都能导致电容器温升过高。

c. 电容器外壳膨胀。高电场作用下使得电容器内部绝缘介质物游离而分解出气体或部分元件击穿电极对外壳放电等原因, 使得电容器的密封外壳内部压力增大, 导致电容器外壳膨胀变形, 这是运行中电容器故障的预兆。

d. 电容器闪络。运行中电容器瓷瓶闪络放电, 其原因是瓷绝缘有缺陷或表面积污。

e. 电容器异音。电容器是一种静止电器又无励磁部分, 在正常运行情况下无任何声音。如果运行中发现有放电声或其他不正常声音说明电容器内部有故障。

f. 电容器爆炸。元件内部发生极板间或极板对外壳绝缘击穿放电时就会导致电容器爆炸。

1.2 电容器保护

用于无功补偿装置的电容器保护有 3 种: 新型的三段式相间过电流保护、相电压式电压平衡保护及母线电压保护, 3 种保护的合理配合能够正确反映电容器的各种故障及不正常运行状态^{①[4]}。

1.2.1 新型的三段式过电流保护^②

三段式过电流保护以 A、C 相电流差为判据, 5 组电容器分别接线, 用来反映相间短路故障, 每路保护的接线见图 1, 保护的動作条件分别是: 第 1 段, $I_{ac} \geq I_{setI}$ (下角标 set 表示定值), 以固有的動作时间跳闸; 第 2 段, $I_{ac} \geq I_{setII}$, 延时时间 $t = t_{setII}$; 第 3 段, $I_{ac} \geq I_{setIII}$, 延时时间 $t = t_{setIII}$ 。保护动作后, 继电器的接点闭合 1 s, 人工复位后返回。为了避免电容器投切开关切断超过遮断容量的电流, 增加了电流越限闭锁功能, 以防开关爆炸。

1.2.2 电压平衡保护

传统的熔断器、过电流保护都无法解决电容器故障爆炸问题, 但按电容器组相电压接线的电压平衡保护能够正确反映单相电容器内部单元电容的漏电流与击穿故障, 可从 2 个方面分析。

a. 熔断器与传统的过电流保护无法解决电容器

① 孙士民. 10 kV 系统电压无功控制装置说明书. 济南迪生电子.

② 孙士民. 10 kV 系统保护装置说明书. 济南迪生电子.

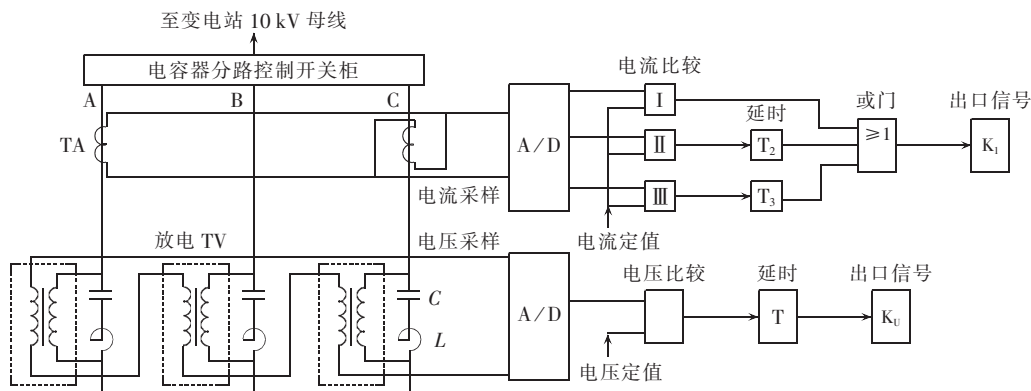


图 1 电容器电流、电压保护的接线

Fig.1 Connections of capacitor current & voltage protection

爆炸的问题。由于电容器故障的过程是从泄漏开始经过一定时间到爆炸的,在爆炸之前的泄漏电流比较小,此时熔断器不起作用,只有短路爆炸以后,电流增加到熔断器的熔断值时熔断器才起作用,但此时熔断器与过电流保护的動作已经滞后。根据实际的运行经验以及对多次被烧毁的电容器解体分析可知,损坏者只有一相中的一只是爆炸的,故障过程中的电流依然很小,熔断器与过电流保护不起保护作用。另外,由于故障持续的时间太短,熔断器或过电流保护来不及动作,电容器已经爆炸了,所以熔断器与过电流保护解决不了电容器的爆炸问题。

b. 按电容器组相电压接线的电压平衡保护的動作行为分析。新式的零序保护按三相对中性点电压之和接线(见图 1),启动电压直接取自故障电容器本身,启动判据为 $3U'_0 = |U'_a + U'_b + U'_c| \geq 3U'_{0SET}$,其中 U'_a 、 U'_b 、 U'_c 是每相对中性点的电压。新式的电压平衡保护只反映电容器的内部爆炸故障,不反映母线系统对地的故障。根据相量分析,假设 C 相 3 只电容器的某一只发生击穿短路故障,则 $3U'_0 = U_m/3$,见图 2(图中 U_m 为电压幅值)。但是,假设系统 C 相发生对地故障时,因为电源的三相对称性并没有变化,所以 $3U'_0$ 电压值约为 0,根据这种原理实现的保护具有很高的灵敏度。

实际上,中性点漂移时会产生不平衡电压,漂移时 $3U'_0$ 的情况见图 3。新式的电压平衡保护按躲过中性点漂移时的不平衡电压整定。这种电压平衡保护对电容器的故障不仅有较高的灵敏度,而且動作行为受区外线路故障的影响较小,提高了动作的可

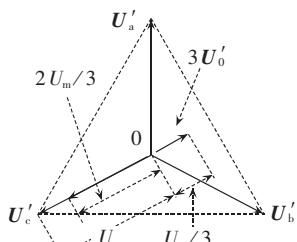
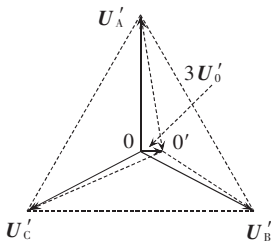


图 2 C 相发生短路

故障时的相量图
Fig.2 Phasor diagram
of C-phase fault图 3 中性点漂移时
产生的 $3U'_0$ Fig.3 $3U'_0$ caused by
neutral-point drift

靠性。事实证明新式的电压平衡保护,不仅能够完全取代传统的电容器保护,而且原理先进、动作灵敏,对电容器的轻微故障也能够反映,因此这种保护投入运行以后没有出现电容器爆炸的恶性事故。

1.2.3 母线电压保护

电压保护的电压信号取自于母线 TV,逻辑位于无功补偿控制器之中,下面介绍功能设置与判据。

a. 过电压保护。動作条件: $U_{ab} > U_{dg}$ 或 $U_{bc} > U_{dg}$ 或 $U_{ca} > U_{dg}$,其中, U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ca} 为母线线电压, U_{dg} 为过电压保护定值。

b. 低电压保护。動作条件: $U_{ab} \leq U_1$ 或 $U_{bc} \leq U_1$ 或 $U_{ca} \leq U_1$,其中, U_1 为低电压保护定值。

c. TV 断线闭锁。当 $U_a < 8V$ 、 $I_a > 0.5A$;或 $U_c < 8V$ 、 $I_a > 0.5A$;或 $U_b < 8V$ 、 $I_a > 0.5A$ 时,认为 TV 断线发 TV 断线报警,且闭锁调压及补偿動作输出。

2 串联电抗器,解决了涌流和谐振过电压问题

2.1 电容器合闸涌流的限制

串联电抗器在系统中的位置见图 1。电容器在投入的瞬间,会产生涌流,其频率约为 250~4 000 Hz,同时伴随产生过电压。单独一组电容器的合闸涌流约为额定电流的 5~15 倍,大小取决于系统电源的阻抗,逐级投入电容器组时,会产生追加合闸涌流,约为电容器额定电流的 25~250 倍,大小主要取决于已投入电容器组与追加投入电容器组间的阻抗。大电流将会产生很大的机械应力,电流所经过的电容器、断路器和电网上的其他设备可能造成损坏,特别是影响断路器的使用寿命。涌流主要是电容器合闸时的暂态过程或谐波谐振引起的。

电容器接通基波电源时,由于合闸角的不同,会产生暂态过程,暂态过电流的数值与谐振问题是截然不同的,其峰值也远小于谐波谐振时的数值,限制合闸涌流的方法主要是安装串联电抗器。串联电抗率为 0.1%~2.0% 的电抗器,对每组 1 200 kvar 以下电容器组产生的涌流有很好的抑制作用。

2.2 电容器谐振过电压的限制

补偿电容器对谐波有放大作用,补偿电容器对

谐波放大后产生谐振过电压与过电流。谐波作为电流源,作用于系统中,对局部网络在理想状况下,在不计外围电路的作用时的分析如下:谐波作为电流源作用于 X_C 与 X_L 的计算电路见图 4^[5],图中 I_s 为电流源谐波信号, $X_L = n\omega L$, $X_C = 1/(n\omega C)$, 设 X_L 与 X_C 的并联电抗为 X , 则

$$X = X_C X_L / (X_C - X_L)$$

从上式中可知,当 $X_C = X_L$ 时电容器与电感器发生谐振,此时 X_C 与 X_L 之间进行能量交换。电容与电感上的电压 U_{ab} 及 I_C 、 I_L 如下:

$$U_{ab} = jX I_s = j \frac{X_C X_L}{X_C - X_L} I_s, \quad I_C = \frac{U_{ab}}{-jX_C}, \quad I_L = \frac{U_{ab}}{jX_L}$$

显然,当 $X_C = X_L$ 时,即使 I_s 很小, $U_{ab} \rightarrow \infty$, $I_C \rightarrow \infty$, $I_L \rightarrow \infty$ 。

当计入系统阻抗时,系统阻抗对谐振过电压 U_{ab} 的升高有抑制作用,同时对电容器与电感器的电流的增大也有抑制作用。

限制谐振过电流的方法也是安装串联电抗器,串联电抗率为 4.5%~6.0% 的电抗器,使补偿电容器之处对某次谐波呈感性状态,以消除谐振过电压与过电流的影响。

在现场可根据系统情况选用不同比率的电抗器,使之既能有效抑制系统高次谐波,又能抑制电容器的涌流,满足将电流限制在 10 倍额定值以下的要求。

3 放电线圈,解决了消除剩余电压的问题

电容器切除后,两极处于储能状态,具有一定的电能和电压,电压初始值与断路器断开瞬间电压的相位有关。所带电荷反映在电容器两端为直流电,极性不确定,若在这种情况下再次合闸,可能会产生很高的冲击电流与过电压,对设备甚至人身有很大的危害,因此在电容组切除后必须尽快放电,放电的方法是在电容器组上并联放电线圈。由于切除后的电容器所带的电属直流,并联一般的电压互感器或变压器的一次线圈就可以快速将电能放掉,放电过程的原理电路见图 5。下面分析放电线圈的工作原理。

由图 5 可知:

$$i_c = C \frac{du_c}{dt}, \quad u_{L2} = L_2 \frac{di_c}{dt} = L_2 C \frac{d^2 u_c}{dt^2}$$

开关断开以前,电容电路处于稳态,电源电压为

$$u_s = U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

开关断开以后,电路的暂态方程为

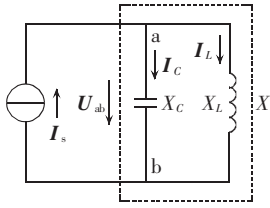


图 4 谐波作为电流源作用于 X_C 与 X_L 的计算电路

Fig.4 Harmonic as current source exerting on X_C and X_L

$$L_1 C \frac{d^2 u_c}{dt^2} + L_2 C \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c = 0$$

参数: $R_1 = 3.6 \text{ k}\Omega$, $X_{L1} = 36 \text{ k}\Omega$, $X_{L2} = 0.48 \Omega$, $X_C = 8 \Omega$, $L_1 = X_{L1}/\omega = 36000/314 = 114.6(\text{H})$, $L_2 = X_{L2}/\omega = 0.48/314 = 0.0015(\text{H})$, $L = L_1 + L_2 \approx L_1$, $C = 1/(X_C \omega) = 1/(8 \times 314) = 4 \times 10^{-4}(\text{F})$, $2\sqrt{L/C} = 2\sqrt{114.6/(4 \times 10^{-4})} = 10.7 \times 10^2$, $R = 3.6 \times 10^3 > 2\sqrt{L/C}$, 所以该电路为非振荡放电电路。

$$\text{二阶方程 } L_1 C \frac{d^2 u_c}{dt^2} + L_2 C \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \text{ 的}$$

$$\text{特征根为 } p = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = -15.7 \pm 15, \text{ 即}$$

$$p_1 = -0.7, p_2 = -30.7。$$

所以电容电压:

$$u_c = \frac{U_0}{p_2 - p_1} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) =$$

$$-\frac{U_0}{30} (-30.7 e^{-0.7t} + 0.7 e^{-30.7t}) = \left(e^{-0.7t} - \frac{0.7}{30} e^{-30.7t} \right) U_0$$

放电电流:

$$i = -C \frac{du_c}{dt} = -\frac{U_0}{L(p_2 - p_1)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) =$$

$$-\frac{U_0}{114.6 \times 30} (e^{-0.7t} - e^{-30.7t})$$

$$t = 3 \text{ 时}, u_c = \left(e^{-0.7t} - \frac{0.7}{30} e^{-30.7t} \right) U_0 = \left(e^{-2.1} - \frac{0.7}{30} e^{-92.1} \right) \times U_0 = e^{-2.1} U_0 = 0.122 U_0。 \text{ 其中, } U_0 = U_m / \sqrt{2} = 10 / \sqrt{3} = 5.77(\text{kV}), \text{ 所以 } u_c = 0.122 U_0 = 70(\text{V})。$$

采用标准的电压互感器作为放电线圈,1200 kvar 电容 3 s 内就将电容两端电压下降至 70 V 以下。

4 自动识别电站运行方式,实现了按电压无功的要求调整分接头功能^[6-9]

前曾述及,DS3 型无功补偿装置适用于变电站 5 种运行方式:双变压器变电站 2 台变压器并列运行、双变压器变电站 1 号主变运行 2 号主变停止、双变压器变电站 2 号主变运行 1 号主变停止、单变压器变电站、双变压器变电站 2 台变压器分段运行。控制器按下述原则自动识别运行方式,确定动作判据。

4.1 1 号主变低压侧开关断路器处于合位

当母联开关闭合时,视为 2 台主变并列运行,以 1 号主变功率因数和 1 号、2 号主变无功需求量之和,作为补偿动作条件。

当母联开关断开时,视为 1 号主变需要补偿,以 1 号主变功率因数及无功需求量为补偿动作条件。

4.2 1 号主变低压侧开关断路器处于分位

当母联开关闭合时,视为 2 号主变运行,以 2 号主变功率因数及其无功需求量为补偿动作条件。

当母联开关断开时,视为 1、2 号主变都不运行,处于不补偿状态。

控制器按照九区图控制法控制主变有载调压装置动作进行升、降压,控制专用断路器的合、分来投入或切除电容器组。在调压上限以下、调压下限以上

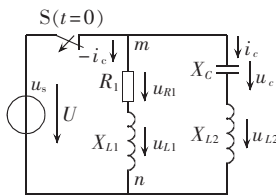


图 5 放电线圈分析的计算电路

Fig.5 Discharge coil analysis

设置具有准确边界条件的模糊控制区域,再加上一定的动作间隔防止调压和投切电容的振荡。值得注意的是,2 台变压器并联运行时的调压必须同步进行,否则若一台调压另一台不动时,并联运行的 2 台变压器必然会出现环流。装置的判据与逻辑中设置了相应的功能,当一台调压失灵后,停止输出调压命令,并发告警信号。

5 新型的机卡保护,解决了继电器接点烧毁问题

机卡保护是防止开关拒动时烧毁继电器接点的一种保护。开关跳闸是由继电器接通跳闸回路,开关跳闸后由辅助接点断开回路的电流,跳闸电流与跳闸线圈的阻值有关^[10],一般设计开关跳闸线圈电阻 $R=88\ \Omega$,跳闸电流 $I=U/R=220\text{ V}/88\ \Omega=2.5\text{ A}$ 。

如果开关在分闸过程中,跳闸回路的电流已接通,但是开关没有跳开,或者开关虽已跳开,但其辅助接点没有复位,则跳闸回路的电流要靠跳闸继电器切断,值得考虑的是 2.5 A 直流电流在没有专门的断弧、消弧手段的情况下,只靠一般的继电器是断不开的,此时只有将拉弧的跳闸继电器接点烧断。据统计在低压系统中由于开关机构的质量问题,这种烧毁跳闸继电器接点的事故是常见的。引用机卡保护使问题得到了彻底的解决。

6 通过专用开关的分散控制,实现了按负荷变化进行电容器投切功能^[11-13]

投切电容器必须配置专门的开关。因为开关投电容器时存在涌流,切电容时存在过电压,另外开关动作频繁,所以电容器投切开关同负荷开关有很大的区别。

装置采用分体模块式高压专用真空断路器,一面柜体内可安装 5 台,可以根据总补偿容量以及负荷变化情况,按照等容或不等容的原则灵活方便地进行分组、分级补偿。电容器组按照控制器的指令自动循环投切,保证各电容器组均时使用。因采用的是分体模块组合,当某组出现故障时可自动闭锁,不影响其他组的正常投切。通过对开关的分散控制和电容器组的灵活搭配,补偿装置适应负荷变化的能力大幅提高,电容投入组数和总容量自动跟踪负荷的变化,从而提高了无功补偿精度。

7 结语

DS3 型无功补偿装置以多目标、多约束的控制条件,适时、可靠的控制方式,解决了电压与无功的综合控制问题;逻辑上采用九区图模糊控制算法,有效地防止了投切的振荡,提高了补偿精度;工艺上采用 5 路分体模块式高压真空专用断路器,实现了分组并自动循环投切;结构上同时采用串联电抗器与放电线圈的并联,解决了涌流、谐振过电压与剩余电压的问题。独特的三段过流、相电压式零序电压保

护,解决了保护可靠性与灵敏度的问题;运行表明,其性能指标良好,满足变电站电压与无功综合控制的需要。

参考文献:

- [1] 廖学琦. 农网线损计算分析与降损措施[M]. 北京:中国水利电力出版社,2003.
- [2] 虞忠年,陈星莹,刘昊. 电力网电能损耗[M]. 北京:中国水利电力出版社,2000.
- [3] 任丕德,刘发友,周胜军. 动态无功补偿技术的应用现状[J]. 电网技术,2004,28(23):81-83.
REN Pi-de,LIU Fa-you,ZHOU Sheng-jun. The application situation of dynamic reactive power compensation technology[J]. Power System Technology,2004,28(23):81-83.
- [4] 苏文博,于洲春,孙士民. 变电站 10 kV 系统电压无功综合控制装置的研制[J]. 电网技术,2003,27(11):72-74.
SU Wen-bo,YU Zhou-chun,SUN Shi-min. Development of voltage-reactive power integrative control equipment for 10 kV power system in substation[J]. Power System Technology,2003,27(11):72-74.
- [5] 邱关源. 电路[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [6] 张永健,应敏华,高亮. 电网监控与调度自动化[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [7] 崔弛. 低压配网无功补偿浅析[J]. 电网技术,2000,24(7):71-72.
CUI Chi. Preliminary analysis of reactive power compensation in low voltage distribution network[J]. Power System Technology,2000,24(7):71-72.
- [8] 王建强. 智能性配电网无功补偿系统[J]. 电网技术,2003,27(7):80-81.
WANG Jian-qiang. Intelligent reactive power compensating system for distribution network[J]. Power System Technology,2003,27(7):80-81.
- [9] 王瑞艳,赵建平,梁志珊. 基于 PLC 的变电站电压无功综合控制系统[J]. 电力自动化设备,2003,23(4):31-33.
WANG Rui-yan,ZHAO Jian-ping,LIANG Zhi-shan. PLC-based integrated control system for voltage and far control of substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(4):31-33.
- [10] 苏文博,李鹏博,张高峰. 继电保护事故处理技术与实例[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [11] 何永华,简晓霞,陈霞. 发电厂及变电站的二次回路[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [12] 杜红卫,廖志伟. 智能型变电站电压、无功综合自动控制装置[J]. 电力自动化设备,2001,21(2):42-44.
DU Hong-wei,LIAO Zhi-wei. Intelligent automatic control equipment for substation voltage and reactive power[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(2):42-44.
- [13] 周郢飞,赵金荣. 电压无功自动控制软件及其应用[J]. 电力系统自动化,2000,24(9):56-58.
ZHOU Ye-fei,ZHAO Jin-rong. Software for automatic control of voltage and reactive power in substation and its application[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(9):56-58.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

苏文博(1958-),男,山东寿光人,教授,从事继电保护以及电力设备故障分析工作(E-mail:yiyswb@163.com);

孙士民(1962-),男,山东济南人,高级工程师,从事 10 kV 系统电压无功控制研究工作;

刘娟(1972-),女,山东菏泽人,高级工程师,从事电力系统继电保护工作;

潘向华(1976-),男,山东德州人,工程师,从事电力系统自动化工作。

(下转第 46 页 continued on page 46)

Strategies to prevent faults of voltage and reactive power control equipment for 10 kV system

SU Wen-bo¹, SUN Shi-min², LIU Juan³, PAN Xiang-hua⁴

(1. Shandong Electric Power Research Institute, Ji'nan 250002, China;

2. Jinan Disheng Electronic Co., Ltd., Ji'nan 250400, China;

3. North China Electric Power Dispatching Bureau, Beijing 100053, China;

4. Shandong Extrahigh Power Subcompany of SEPCO, Ji'nan 250021, China)

Abstract: Operating features, failure modes and countermeasures of voltage and reactive power control equipments in 10 kV system of substation are studied. The voltage balance protection according to connections of capacitor group is used for the inrush current and resonance during its switch-in, the series reactor for the explosion during its operation and the parallel discharge coil for the residual voltage during its switch-out. To meet needs of real-time voltage control and reactive power compensation, the adaptive identification of operating mode and distributed control of special breakers are applied. The integrated voltage control and reactive power compensation of substation, the prevention of system resonant over-voltage and capacitor residual voltage, the reliability and sensitivity of protection, and the grouping and circulating switching of capacitors are realized. Measures to prevent faults and effects of reactive power control have been verified in the operation of more than twenty substations for three years.

Key words: substation; reactive voltage control; fault analysis and processing technology