

10 kV 柱上式高压无功补偿装置有关问题的讨论与建议

江钧祥¹, 丁国成², 陶梅²

(1. 合肥华威自动化有限公司 安徽 合肥 230011; 2. 安徽省电力科学研究院 安徽 合肥 230022)

摘要: 文中对装置进行分析后认为: 固定接入装置存在因线路自动重合闸而产生高的过电压以及运行中可能出现过补偿等隐患; 当采用外熔断器或内熔丝作为电容器内部故障保护时, 则分别要求每相电容器并联台数不少于4台或电容器内串联段中需有足够数量的并联元件。据此提出了适当增加并联元件数、提高元件的耐电强度以及增设不平衡保护的建议。

关键词: 柱上式高压无功补偿装置; 电容器组; 固定接入装置; 熔断器; 内熔丝; 不平衡保护

中图分类号: TM531.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-1757(2013)02-0005-07

Discussion and Suggestion on Some Problems of 10 kV Pole-mounted High Voltage Reactive Power Compensation Device

JIANG Jun-xiang¹, DING Guo-cheng², TAO Mei²

(1. Hefei Huawei Automation Co., Ltd., Hefei 230011, China;

2. Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230022, China)

Abstract: In this paper, it is thought after the analysis of the device that the fixed access device has such hidden dangers as high overvoltage due to reclosing operation of line and over compensation which is possibly occurs during the operation. In case of adopting external fuse or internal fuse wire as internal fault protection of capacitor, the number of parallel connected capacitors for each phase not less than 4 units and sufficient shunt elements in the series connection section inside the capacitor are required respectively. Based on this reason the suggestions has been put forward that appropriately increase the number of shunt elements, improve withstand voltage strength of elements and add imbalance protection.

Keywords: pole-mounted high voltage reactive power compensation device; capacitor bank; fixed access device; fuse; internal fuse; imbalance protection

0 引言

柱上式高压无功补偿装置(以下简称装置)在降低线路损耗与调整电网电压方面发挥了很大的作用,已得到广泛的应用^[1-3]。但其在实际运行中仍存在一些问题,需要得到我们的重视和解决。

1 固定接入装置在运行中存在安全隐患不宜继续采用

固定接入装置具有结构简单、投资较低的优点,因此目前仍得到某些部门使用,但采用该类装

置存在一定安全隐患。

1) 线路上一般均安装自动重合闸装置,当线路故障跳闸后,在较短时间内就会启动重合闸,线路与电容器组一起被重新投入,这时就可能在电容器组上产生高的操作过电压。

电容器组的投入可以等值为 RC 串联电路在正弦电路下的接通,如图 1 所示。

当 $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ 则电路方程为:

$$RC \frac{du_c}{dt} + u_c = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

解式(1)得稳态电压:

收稿日期: 2012-12-25

$$u_c' = \frac{U_m}{Z\omega C} \sin(\omega t + \varphi + \psi - 90^\circ) \quad (2)$$

式(2)中 $Z = \sqrt{R^2 + [1/(\omega C)]^2}$; $\psi = \arctan \frac{1}{R\omega C}$ 。

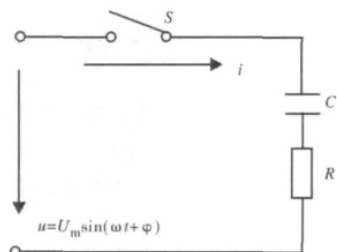


图 1 重投电容器组时的单相等值电气原理图
Fig.1 The single-phase equivalent electrical schematic diagram in there-switching of capacitor bank

$$\text{暂态电压 } u_c'' = A e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3)$$

式(3)中 A 与合闸时电容器的初始状态有关。若合闸时,电容器没有充电,即 $t=0$ 时 $u_c = 0$ 则:

$$A = -\frac{U_m}{Z\omega C} \sin(\varphi + \psi - 90^\circ)$$

$$\text{得 } u_c = \frac{U_m}{Z\omega C} \sin(\omega t + \varphi + \psi - 90^\circ) -$$

$$\frac{U_m}{Z\omega C} \sin(\varphi + \psi - 90^\circ) e^{-\frac{t}{RC}}$$

当在 $\varphi + \psi = 0$ 时合闸,则:

$$u_c = \frac{U_m}{Z\omega C} \sin(\omega t - 90^\circ) + \frac{U_m}{Z\omega C} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4)$$

由(4)式可知,电容器投入时,若尚未充电,其操作过电压不会超过稳态电压的 2 倍,是符合电容器使用条件的^[4-5]。

但当合闸时,电容器已充电,设 $t=0$ 时 $u_c = U_{cm}$ 则:

$$A = -\frac{U_m}{Z\omega C} \sin(\varphi + \psi - 90^\circ) + U_{cm}$$

$$\text{得 } u_c = \frac{U_m}{Z\omega C} \sin(\omega t + \varphi + \psi - 90^\circ) -$$

$$\left[\frac{U_m}{Z\omega C} \sin(\varphi + \psi - 90^\circ) - U_{cm} \right] e^{-\frac{t}{RC}}$$

同样在 $\varphi + \psi = 0$ 时合闸,则:

$$u_c = \frac{U_m}{Z\omega C} \sin(\omega t - 90^\circ) + \left(\frac{U_m}{Z\omega C} + U_{cm} \right) e^{-\frac{t}{RC}} \quad (5)$$

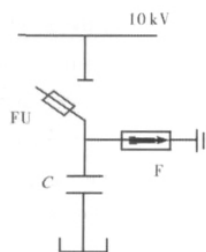
把式(5)与式(4)相比较,可知式(5)中的暂态分量中迭加了合闸时电容器的剩余电压 U_{cm} ,

毫无疑问,在一定条件下(例如当 $U_{cm} = U_m$ 时)其操作过电压将大大超过 2 倍稳态电压,这样的过电压是不允许的。

在 JB/T 10558—2006《柱上式高压无功补偿装置》中规定:在任何情况下投入电容器之前电容器上的剩余电压应不超过额定电压的 10%。

线路无功补偿装置中电容器的放电器件一般为放电电阻,根据 JB/T 10558—2006 要求,电容器应能在断开电源后,其剩余电压在 5 min 内由 $\sqrt{2}U_n$ 降至 50 V 以下。当线路故障跳闸断电后,电容器通过内部放电电阻放电,由于重合闸整定时间很短,电容器的剩余电压很难降至 $0.1U_n$ 以下。因此,当重合闸启动后,电容器被带电合闸,电容器组出现过高的操作过电压可能性是很大的,这不仅对电容器的绝缘构成威胁,使其绝缘受损或击穿,而且对接于线路上的其他电气设备(如变压器)的绝缘同样构成威胁,直接影响电气设备的安全运行。

2) 固定接入装置用跌落式熔断器作为投切执行元件,如图 2 所示,显然不符合相关标准要求。



FU—跌落式熔断器;
F—配电型金属氧化物避雷器;
C—高压并联电容器

图 2 固定接入装置一次接线图

Fig.2 Primary wiring diagram of the fixed access device

图 2 中跌落式熔断器实际上代替了开关的作用。GB/T 11024.1—2001 与 JB/T 10558—2006 中均规定在切合电容器时,开关不应发生重击穿,以免产生高的操作过电压,用跌落式熔断器代替开关显然不能满足此要求。而且,在 JB/T 10558—2006 中还特别规定了:“严禁用跌落式熔断器及隔离开关投切电容器组”。

3) 固定接入装置的无功补偿容量基本是一定的,但线路上的负荷是变化的和波动的,固定补

偿不能进行适当的调整,轻负荷时有时会发生过补偿而向系统倒送无功,出现使线路损耗不降反增的现象,达不到降耗节能的目的。

对于负荷均匀分布的线路进行无功补偿后,其损耗降低率可用下式^[6-9]表示:

$$\eta = 6KL - 3K^2L - 3KL^2 \quad (6)$$

式(6)中, K 为无功补偿度; L 为安装点的距离比(无功补偿装置离变电站母线的距离与线路长度之比)。

对式(6)求解,可得 $L = 2/3$, $K = 2/3$ 时, η 为最大值 $\eta = 88.9\%$,所以线路无功补偿装置一般安装在 $L = 2/3$ 处。当实际无功补偿度 K 随负荷变化而相应变化, K 大于或小于 $2/3$ 时,其损耗降低率 η 均下降。

当实际无功补偿度 $K > 1$, 会因过补偿而出现线路损耗增加的情况。以 $\eta < 0$, $L = 2/3$ 代入式(6),可解得 $K > 4/3$,说明当 $K > 4/3$ 时,线路损耗不降反增,值得注意。

2 采用并联电容器单台保护用熔断器作为电容器内部故障保护

2.1 熔断器的工作特性

目前使用的熔断器,其熔丝是否熔断决定于故障电容器的故障电流以及与其并联的完好电容器的放电能量。

当电容器内部某个元件发生击穿时,同时也短接了该串联段,致使其他完好串联段上的电压增高,这些串联段中的元件也将相继发生击穿,流过电容器的故障电流增大,当故障电流达到一定值时,熔断器内的熔体熔化,熔断器动作将故障电容器从回路中切除^[10-11]。

熔断器的熔断特性是:

- 1) $1.1I_{nf}$ 时, 4 h 不熔断;
- 2) $1.5I_{nf}$ 时, 熔断时间 $t \leq 75$ s;
- 3) $2.0I_{nf}$ 时, 熔断时间 $t \leq 7.5$ s;

I_{nf} 为熔断器内熔丝的额定电流。

图3为某厂生产的熔断器熔丝的安秒特性曲线,由图3可知,通过熔断器熔丝的电流越大,其动作时间越短。

电容器各串联段逐步击穿至只剩下一个完好的串联段时(这时电容器内部的串联段击穿率约

为 67% ~ 75%) ,若熔断器不能在该串联段击穿前动作,那么故障电容器就会发展至全击穿,与其并联的完好电容器放电电流和系统电流注入,使故障电流急剧增加,内部介质在电弧作用下迅速气化膨胀,从而可能导致箱壳爆裂。

从工频电流下对故障的模拟试验得知:对于膜纸复合电容器,从极间全击穿起到电容器外壳爆裂,实测到的最短时间约为 0.2 s,若熔断器的动作时间控制在 0.1 s 以内,则可认为电容器组是安全的^[12]。

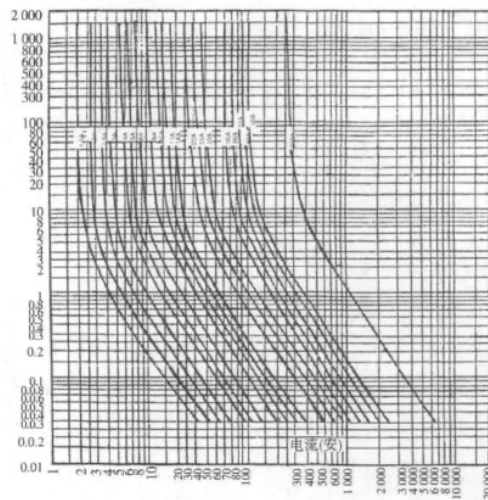


图3 熔断器熔丝的伏安特性曲线
Fig.3 Volt-ampere characteristic curve of fuse wire of the fuse

2.2 电容器的故障电流 $I_{\delta c}$

图4为柱上式无功装置的原理接线图。

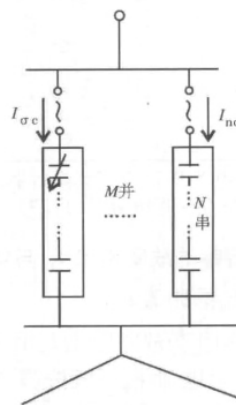


图4 柱上式高压无功补偿装置接线示意图
Fig.4 Wiring schematic diagram of pole-mounted high voltage reactive power compensation device

一般均为三相星形中性点不接地。其每相有 M 台电容器并联, 每台电容器均串联有熔断器, 每台电容器内部有 N 个串联段^[13]。

假设单台电容器的额定电容为 C_n , 则每相的电容量为 MC_n 。

故障前, 各相电容 $C_A = C_B = C_C = MC_n$; 电容器组接入三相对称的电网后, 其三相电压平衡, 即 $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_A, \dot{U}_{CB} = \dot{U}_B, \dot{U}_{CC} = \dot{U}_C$ 。

若在 A 相中某台电容器发生故障, 其串联段的击穿率为 δ , 则故障电容器的电容量 C_δ 为:

$$C_\delta = \frac{1}{1-\delta} C_n \quad (7)$$

故障相电容 $C_{\delta A}$ 为:

$$C_{\delta A} = \frac{1}{1-\delta} C_n + (M-1) C_n = (M + \frac{\delta}{1-\delta}) C_n \quad (8)$$

电容器组的中性点电位偏移 \dot{u}_0 :

$$\dot{u}_0 = \frac{C_{\delta A} \dot{U}_A + C_B \dot{U}_B + C_C \dot{U}_C}{C_{\delta A} + C_B + C_C} = \frac{(M + \frac{\delta}{1-\delta}) C_n \dot{U}_A + MC_n \dot{U}_B + MC_n \dot{U}_C}{(M + \frac{\delta}{1-\delta}) C_n + MC_n + MC_n} \quad (9)$$

经整理后可得:

$$\dot{u}_0 = \frac{\delta}{3M(1-\delta) + \delta} \dot{U}_A \quad (10)$$

故障相电压:

$$\dot{U}'_{CA} = \dot{U}_A - \dot{u}_0 = \frac{3M(1-\delta)}{3M(1-\delta) + \delta} \dot{U}_A \quad (11)$$

流过故障电容器的故障电流 $I_{\delta c}$ 为:

$$I_{\delta c} = \dot{U}'_{CA} \cdot \omega C_\delta = \frac{3M}{3M(1-\delta) + \delta} \dot{U}_A \omega C_n \quad (12)$$

由式(12)可知 $I_{\delta c}$ 的大小与 M, δ 有关。

2.3 电容器故障电流 $I_{\delta c}$ 与额定电流 I_{nc} 的比值 K 单台电容器的额定电流 I_{nc} 为:

$$I_{nc} = \dot{U}_A \omega C_n \quad (13)$$

设 K 为电容器故障电流 $I_{\delta c}$ 与电容器额定电流 I_{nc} 的比值, 所以:

$$K = I_{\delta c} / I_{nc} = \frac{3M}{3M(1-\delta) + \delta} \quad (14)$$

由式(14)可知, 流过故障电容器的故障电流 $I_{\delta c}$ 与电容器额定电流 I_{nc} 的比值 K 决定于并联台数 M 及串联段击穿率 δ , 表 1 给出了在不同的 δ 与 M 下的 K 值。

表 1 柱上式高压无功补偿装置中电容器 $I_{\delta c}$ 与 I_{nc} 的比值 K
Tab. 1 Ratio K between $I_{\delta c}$ and I_{nc} of capacitor in the pole-mounted high voltage reactive power compensation device

δ	台数 M									
	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16
0.5	1.5	1.71	1.8	1.85	1.89	1.92	1.94	1.95	1.95	1.96
2/3	1.8	2.25	2.45	2.57	2.7	2.77	2.81	2.84	2.86	2.88
0.75	2	2.67	3	3.2	3.43	3.56	3.64	3.69	3.73	3.76
1.00	3	6	9	12	18	24	30	36	42	48

* $\delta = 0.5, 0.75$ 是考虑电容器内有 4 个串联段, 其中分别有 2 个串联段或 3 个串联段击穿短路, $\delta = 2/3$ 是考虑电容器内有 3 个串联段, 其中有 2 个串联段击穿短路。

2.4 故障电容器的故障电流 $I_{\delta c}$ 与熔断器熔丝额定电流 I_{nf} 的比值 F

熔断器的动作与故障电流 $I_{\delta c}$ 有密切关系。熔断器熔丝的额定电流 I_{nf} 一般按 $(1.37 \sim 1.50) I_{nc}$ 选取^[14]。

设电容器的故障电流 $I_{\delta c}$ 与熔丝的额定电流

I_{nf} 的比值为 F , 则:

$$F = I_{\delta c} / I_{nf} \quad (15)$$

$$F = I_{\delta c} / (1.37 I_{nc} \sim 1.50 I_{nc}) = \frac{1}{(1.37 \sim 1.50)} \cdot \frac{3M}{3M(1-\delta) + \delta} \quad (16)$$

表 2 示出了在不同的 δ 与 M 下的 F 值。

表2 柱上式高压无功补偿装置中 $I_{\delta c}$ 与 I_{nf} 的比值 F^*
 Tab.2 Ratio F^* between $I_{\delta c}$ and I_{nf} of the pole-mounted high voltage reactive power compensation device

δ	台数 M									
	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16
0.5	$\frac{1.09}{1}$	$\frac{1.25}{1.14}$	$\frac{1.31}{1.2}$	$\frac{1.35}{1.23}$	$\frac{1.38}{1.26}$	$\frac{1.40}{1.28}$	$\frac{1.42}{1.29}$	$\frac{1.42}{1.3}$	$\frac{1.43}{1.3}$	$\frac{1.43}{1.31}$
	$\frac{2}{3}$	$\frac{1.31}{1.2}$	$\frac{1.64}{1.5}$	$\frac{1.79}{1.63}$	$\frac{1.88}{1.71}$	$\frac{1.97}{1.8}$	$\frac{2.02}{1.85}$	$\frac{2.05}{1.87}$	$\frac{2.07}{1.89}$	$\frac{2.09}{1.91}$
0.75	$\frac{1.46}{1.33}$	$\frac{1.95}{1.78}$	$\frac{2.19}{2}$	$\frac{2.34}{2.13}$	$\frac{2.50}{2.29}$	$\frac{2.60}{2.37}$	$\frac{2.66}{2.43}$	$\frac{2.69}{2.46}$	$\frac{2.72}{2.49}$	$\frac{2.74}{2.51}$
	$\frac{2.19}{2}$	$\frac{4.38}{4}$	$\frac{6.57}{6}$	$\frac{8.76}{8}$	$\frac{13.1}{12}$	$\frac{17.5}{16}$	$\frac{21.90}{20}$	$\frac{26.28}{24}$	$\frac{30.66}{28}$	$\frac{35.04}{32}$

* 表内 F 值横线上、下数值分别对应电流比 1.37 与 1.5

对表2中的数值进行分析后可见,熔丝的电流比为1.37时的 F 值大于电流比为1.50时的值,也就是它的动作时间较短,灵敏度较高。

同样,当 δ 相同时,其并联台数 M 越大,其熔丝的 F 值越高,例如 $\delta=0.75$, 电流比1.5时, $M \geq 3$ 时,其 $F \geq 2$, 其动作时间 $t \leq 7.5$ s, 而 M 为1~2时,其 F 值为1.33~1.78, 其动作时间将大大增加。所以增加并联台数 M 就能缩短熔断器的动作时间 t , 提高了灵敏度。

根据电力工业无功补偿成套装置质检中心试验站对国内熔断器厂的产品试验结果^[9]表明,对于合格产品,其熔断器开断性能大致为:开断电流为 $8I_{nf}$ (即 $F=8$) 时,动作时间约在0.1 s左右。对照表2可知, $M=4$, 也就是每相有4台电容器并联,电容器发生全击穿时,熔断器可在外壳爆裂前动作(在实际应用中,考虑到熔丝的分散性,一般可取 $M=5$, 以保证安全)。

2.5 柱上式高压无功补偿装置内电容器并联台数 M 往往不能满足熔断器动作要求

通过上述分析可知,柱上式高压无功补偿装置若要用熔断器作电容器内部故障保护,其每相电容器并联台数不应少于4台,否则不能保证电容器安全,但是装置要做到这一点是有困难的。由于受装置空间较小的限制,电容器组往往不能做到每相有4台及以上电容器并联,特别是为了提高补偿效果,采用几组电容器投切的方案更是如此。实际上目前众多装置内的电容器往往每相仅为1台电容器(1组3台)或采用1台三相电容器^[15-16]。

假装置内电容器组由3台单相电容器组

成,电容器内部有4个串联段,每台电容器串联一只熔断器,其熔丝的电流比 $I_{nf}/I_{nc}=1.5$ 。

若该组A相电容器内部有3个串联段击穿短路,即 $\delta=0.75$, 故障后此电容器的端电压为

$$U_{CA}, \text{由式(11)} U_{CA} = \frac{3M(1-\delta)}{3M(1-\delta) + \delta} U_A$$

代人 $M=1$ $\delta=0.75$

$$\text{得 } U_{CA} = 0.5U_A$$

此电压即为施加于故障电容器内部完好串联段的电压,而故障前,该串联段上的电压应为 $U_A/4$ 。

因此故障后,该串联段承受2倍过电压。由表2可知,流过该故障电容器的故障电流 $I_{\delta c}$ 与 I_{nf} 的比值为1.33,故其熔断时间将大大超过75 s, 使该串联段发生击穿,电容器全击穿。

如果该电容器发生全击穿,由表2可知,其 $F=2$, 故熔断器动作时间在7.5 s左右,大大超过0.1 s, 电容器外壳完全可能发生爆裂。

综上所述柱上式高压无功补偿装置在 $M < 4$ 的情况下,熔断器对电容器的内部故障不能起有效的保护作用。

3 用内熔丝作为高压并联电容器内部故障保护,其串联段中要有足够的并联元件数

装置内的电容器组,一般由1台三相电容器(或3台单相电容器)所组成,而选用内熔丝电容器,则可在电容器内元件发生击穿时,熔丝熔断切除故障元件以保证电容器能继续运行,从而延长装置的工作寿命。但要使内熔丝电容器能安全可

靠地工作, 决定于其串联段中并联元件的数量。

3.1 电容器宜适当增加串联段中的并联元件数

装置内的电容器组的单组容量较小, 一般为 150~600 kvar。以单组容量 300 kvar 为例, 其单相容量为 100 kvar, 按目前正常设计, 其串联段中的并联元件数一般为 3~5 个, 由于并联元件数较少, 内熔丝不能可靠动作。据文献 [17] 介绍, “根据试验研究, 通常认为当一个元件段的并联元件数少于 12 时, 内熔丝开断可靠性变差, 少于 8 时, 内熔丝常常不能开断”。因此, 请制造厂在设计时予以特别考虑, 适当增加并联元件数, 使内熔丝能可靠地工作, 以保证电容器安全运行。

3.2 熔丝熔断后故障段电压的增加幅度与并联元件数有关

设电容器的元件电容为 C_0 , 每一串联段有 m 个元件并联, 段电容为 $C_s = mC_0$, 则电容器电容为 $C_n = mC_0/N$, N 为串联段数。

若电容器两端的电压为额定电压 U_n , 则其段电压为 $U_{en} = U_n/N$ 。

当电容器在一串联段内有 S 根熔丝熔断, 则该故障段的电容 $C_{es} = (m-S)C_0$ 。设故障段的电压为 U_{es} , 则可得: $\frac{U_{es}}{U_n - U_{es}} = \frac{mC_0/(N-1)}{(m-S)C_0}$

整理后可得:

$$U_{es} = \frac{m}{Nm - NS + S} U_n \tag{17}$$

故障段元件因熔丝熔断而承受的过电压倍数

β 为: $\beta = \frac{U_{es}}{U_{en}} = \frac{NU_{es}}{U_n}$, 代入式 (17), 可得:

$$\beta = \frac{Nm}{Nm - S(N-1)} \tag{18}$$

对于在 10 kV 系统中使用的并联电容器, 其内部的串联段数一般为 $N=4$, 表 3 列出了对应于不同的 m 、 S 的 β 值

表 3 故障段熔丝熔断后的过电压倍数 β
Tab.3 Over voltage factor β after fusing of the faulty section of the fuse

S	台数 M											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1.231	1.176	1.143	1.12	1.103	1.091	1.081	1.073	1.067	1.061	1.057	1.053
2		1.429	1.333	1.273	1.231	1.2	1.176	1.158	1.143	1.130	1.12	1.111
3			1.6	1.474	1.391	1.333	1.290	1.257	1.231	1.209	1.191	1.176

元件的工作寿命与其承受的电压有关, 当元件发生故障熔丝熔断后, 切除了故障元件, 该段的电压 U_{es} 增高, 加快了其他完好元件绝缘介质的老化速度, 可能导致故障段内元件继续击穿, 最终使电容器损坏。

由表 3 可知, 在同等数量的熔丝熔断的情况下, 串联段中并联元件数多的, 其过电压倍数 β 较低, 即元件承受的电压增加相对较少, 其工作寿命也相应较长。

3.3 适当降低工作场强或选用额定电压较高的电容器以提高熔丝的允许熔断数

电容器及其元件的稳态过电压允许值为 1.1 倍额定电压, 但由表 3 可看到, 实际允许熔丝熔断的数量并不多。例如串联组中有 14 个并联元件时, 当熔丝熔断 2 根时过电压倍数为 1.12, 超过了 1.1 倍允许值, 若选用 $12/\sqrt{3}$ kV 额定电压的电容器(或提高元件的耐压强度, 且允许 1.2 倍过电

压), 熔丝熔断 3 根时, 其过电压倍数为 1.191, 尚在允许范围内。

4 结论

1) 由于固定接入装置在线路自动重合闸过程中易出现过高的操作过电压和存在向系统倒送无功等安全隐患, 不宜继续采用;

2) 当装置的每相电容器的并联台数 $M < 4$ 时, 熔断器对电容器内部故障起不到有效的保护作用, 不能保证装置的运行安全;

3) 装置采用内熔丝电容器时, 为保证内熔丝正常开断, 建议增加串联段中的并联元件数;

4) 当装置采用三相电容器时, 由于其容量一般不大, 不宜采用内熔丝, 建议提高电容器电压水平, 以减少发生事故的可能性;

5) 为保证装置的运行安全, 建议增设不平衡保护作为电容器内部故障保护;

6) 建议 JB/T 10558—2006《柱上式高压无功补偿装置》增加相关规定。

参考文献

- [1] 金立军, 安世超, 廖黎明, 等. 国内外无功补偿研发现状与发展趋势[J]. 高压电器, 2008, 44(5): 463-465.
JIN LI-jun, AN Shi-chao, LIAO Li-ming, et al. Present situation and development of reactive power compensation both at home and abroad [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(5): 463-465.
- [2] 何俊正, 申凌云, 李静, 等. 静止无功补偿装置在 35 kV 配电系统中的应用[J]. 高压电器, 2008, 44(4): 350-352.
HE Jun-zheng, SHEN Ling-yun, LI Jing, et al. Application of static var compensator in 35 kV power distribution system [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4): 350-352.
- [3] 黄振跃, 孙玉坤, 任明炜. ±50 kvar 静止无功发生器的软硬件设计[J]. 高压电器, 2010, 46(6): 34-39.
HUANG Zhen-yue, SUN Yu-kun, REN Ming-wei. Development of a ±50 kvar static synchronous compensator [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(6): 34-39.
- [4] GB/T 11024.1—2010. 标称电压 1 kV 以上交流电力系统用并联电容器 第 1 部分: 总则[S].
GB/T 11024.1—2010. Shunt capacitors for a. c. power systems having a rated voltage above 1 kV—Part 1: General [S].
- [5] JB/T 10558—2006. 柱上式高压无功补偿装置[S].
JB/T 10558—2006. Pole mounted high-voltage power factor correction installations [S].
- [6] 江钧祥, 宋少敏, 陶梅. 10 kV 配电线路的降损与无功补偿[J]. 安徽电力, 2007, 24(3): 60-63.
JIANG Jun-xiang, SONG Shao-min, TAO Mei. Loss reduction and reactive compensation on 10 kV distribution lines [J]. Anhui Electric Power, 2007, 24(3): 60-63.
- [7] 江钧祥, 宋少敏, 陶梅. 配电线路的电容补偿分析与讨论[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(2): 12-16.
JIANG Jun-xiang, SONG Shao-min, TAO Mei. Analysis and discussion of capacitor compensation for transmission lines [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(2): 12-16.
- [8] 邵宗岐. 10 kV 线路柱上式无功补偿装置故障分析与改进措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(3): 10-15.
SHAO Zong-qi. Fault analysis and improvement measures on outdoor pole-mounted reactive compensation device for 10 kV line [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(3): 10-15.
- [9] 姚明, 徐涛. 35 kV 及以下变电站及线路的无功补偿分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(6): 27-30, 46.
YAO Ming, XU Tao. Reactive compensation analysis of 35 kV and the below substation and line [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(6): 27-30, 46.
- [10] 电力工程电工手册第二分册“高压熔断器”[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [11] 江钧祥. 并联电容器单台保护用高压熔断器[Z]. 华东电网供用电培训教材, 1984.
- [12] 史班. 高压并联电容器单台保护用熔断器的选用导则[J]. 无功补偿装置, 2005(2): 16-23.
- [13] 车仁青, 刘凌波, 宗占谊, 等. 电缆线路对 110 kV 变电站无功补偿设计计算的影响[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(1): 13-15.
CHE Ren-qing, LIU Ling-bo, ZONG Zan-yi, et al. Influence of cable lines to reactive power compensation design calculation of 110 kV substation [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(1): 13-15.
- [14] GB 50227—2008. 并联电容器装置设计规范[S].
GB 50227—2008. Code for design of installation of shunt capacitors [S].
- [15] 周行星, 司文荣, 张洋, 等. 电网谐波含量对补偿电容器组电流有效值的影响[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(3): 6-9, 17.
ZHOU Xing-xing, SI Wen-rong, ZHANG Yang, et al. Influence of harmonic contents in network to the current r. m. s value of compensating capacitor bank [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(3): 6-9, 17.
- [16] 单永梅, 包文俊, 卿旺平, 等. 10 kV 农村配电网杆上电容器配置计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(1): 16-19.
SHAN Yong-mei, BAO Wen-jun, QING Wang-ping, et al. Calculation of reactive power compensation at 10 kV rural distribution network pole [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(1): 16-19.
- [17] 倪学锋. 问与答[J]. 无功补偿装置, 2006(1).

作者简介:

江钧祥(1940—),男,高级工程师,主要从事高压电器试验工作。

丁国成(1980—),男,工程师,主要从事变压器及状态检修技术管理工作。

陶梅(1964—),女,高级工程师,主要从事电容器检测、无功补偿装置技术研究工作。