

# 电铁并联电容补偿装置差压保护整定方法的改进研究

周晓东<sup>1</sup>, 张长梅<sup>2</sup>, 楚振宇<sup>3</sup>

(1. 铁道第三勘察设计院电化处, 天津 300124; 2. 成都铁路局成都供电段, 四川 成都 610031;  
3. 铁道第二勘察设计院电化处, 四川 成都 610031)

**摘要:** 并联电容补偿装置是我国电气化铁道提高功率因数、降低谐波影响的重要设备。结合电气化铁道实际负荷特性对并联电容补偿装置差压保护的现行整定方法进行了深入分析, 得出由于负荷特性显著不同, 电力系统常用的电容器差压保护的整定方法并不适用于3次谐波含量较大的电铁并联电容补偿装置; 根据实际运行需要提出了两种不同的改进方法并进行了详细计算和比较, 建议采用单支电容器开路故障退出造成的不平衡电压作为电铁并联电容补偿装置差压保护的整定值。

**关键词:** 电气化铁道; 电容器; 差压保护; 不平衡电压

## Study of improving setting method of differential voltage protection for parallel capacitor compensation equipment in electrified railway

ZHOU Xiao-dong<sup>1</sup>, ZHANG Chang-mei<sup>2</sup>, CHU Zhen-yu<sup>3</sup>

(1. The Third Railroad Survey and Design Institute, Tianjin 300124, China; 2. Chengdu Railroad Bureau, Chengdu 610031, China;  
3. The Second Railroad Survey and Design Institute, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Parallel capacitor compensation equipment has very important effect in improving power factor and decreasing the harmonic waves influence in electrified railway. In this paper, the existing setting method of the different voltage protection for parallel capacitor compensation equipment considering the harmonic load characteristic of electrified railway is discussed and the result is found that the existing setting method is not adoptive to the electrified railway in China. Then two improving setting methods considering the real experience are proposed and compared in detail in this paper. The conclusion are suggested that the unbalanced voltage caused by one capacitor unit opening exit will be proper setting value.

**Key words:** electrified railway; capacitor; differential voltage protection; unbalanced voltage

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)09-0010-04

## 0 引言

我国长期采用功率因数较低、谐波含量较高的交直型电力机车, 因此电铁牵引变电所均设置了并联电容补偿装置, 在补偿无功功率的同时兼顾滤除高次谐波。电容器由额定电压为 10.5 kV 或 8.4 kV 的单体电容器先并联后串联(4 串)组成<sup>[1]</sup>。根据电力机车谐波频谱特性, 并联电容补偿装置基本采用偏调谐 3 次滤波支路, 如图 1 所示。

电容器耐受过电压的能力较低, 这是由电容器本身的特点决定的。当一组电容器中个别电容器损坏切除或内部击穿, 使串联的电容器之间的电压分布发生变化, 剩余的电容器承受过电压。由于电容器连续运行的工频过电压不能超过 1.1 倍额定电压<sup>[2~4]</sup>, 通常采用差压保护来保护电容器组内部故障。差压保护灵敏度高、保护范围大、不受合闸涌流、高次谐波及电压波动影响, 能检查出电容器的内部故障并限制事故扩大。

DL/T 584-95 3~110 kV 《电网继电保护装置运行整定规程》4.2.13.6 规定: 差动电压定值按部分单台电容器(或单台电容器内小电容元件)切除或击穿后, 故障相其余单台电容器所承受的电压不长期超过 1.1 倍额定电压的原则整定。目前, 国内电铁保护设备厂商也多采用此原理进行电容器保护<sup>[5]</sup>。

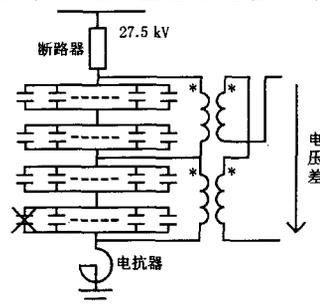


图 1 电铁并联电容补偿装置及差压保护示意图  
Fig.1 The scheme of parallel capacitor compensation equipment and its differential voltage protection principle in electrification railway

## 1 常规整定方法及存在的问题

### 1.1 整定过程

根据以上方法, 设电容器组由单体电容器  $M$  并  $N$  串组成, 电抗率为  $\alpha$ 。当其中一支单体电容器发生故障退出运行时, 与该电容器并联的电容电压将升高, 当有  $K$  支电容器开路退出导致该串剩余电容器所承受的电压将超过单体电容器的额定电压的 1.1 倍时差压保护应动作。设单体电容器额定阻抗模值为  $X_{ce}$ , 则故障前支路阻抗参数为:

$$\text{电容器组 } Z_c = -j \frac{NX_{ce}}{M} \quad (1)$$

$$\text{电抗器阻抗 } Z_L = j\alpha \frac{NX_{ce}}{M} \quad (2)$$

$$\text{支路阻抗 } Z = -j(1-\alpha) \frac{NX_{ce}}{M} \quad (3)$$

故障后支路阻抗参数为:

非故障侧半段电容器阻抗

$$Z_{c1} = -j \frac{\frac{N}{2} X_{ce}}{M} \quad (4)$$

故障侧半段电容器阻抗为:

$$Z_{c2} = -j \left( \frac{\frac{N}{2} - 1}{M} X_{ce} + \frac{X_{ce}}{M-K} \right) \quad (5)$$

$$\text{故障后并补支路电流 } I = \frac{U_M}{Z_{c1} + Z_{c2} + Z_L} =$$

$$\frac{U_M}{-jX_{ce} \left[ \frac{(N-1) - \alpha N}{M} + \frac{1}{M-K} \right]} \quad (6)$$

故障电容器所在段剩余电容器承受的电压应满足:

$$U_{\text{故障段}} = I \frac{X_{ce}}{M-K} \geq 1.1 U_{\text{单体ce}} \quad (7)$$

将式 (6) 代入式 (7), 整理可得:

$$\frac{U_M}{N(M-K)(1-\alpha) + K} \geq 1.1 U_{\text{单体ce}} \quad (8)$$

则  $K$  由下式计算并取整:

$$K \geq \frac{1.1MN(1-\alpha)U_{\text{单体ce}} - MU_M}{1.1(N-1-\alpha N)U_{\text{单体ce}}} \quad (9)$$

则  $K$  支电容器故障产生的不平衡电压为:

$$\Delta U = I(Z_{c2} - Z_{c1}) = -jIX_{ce} \frac{K}{M(M-K)} = \frac{KU_M}{N(M-K)(1-\alpha) + K} \quad (10)$$

$$\text{整定值为: } \Delta U_{dz} = \frac{\Delta U}{K_{\text{可靠}} \cdot n_{\text{压互}}} \quad (11)$$

### 1.2 整定结果

根据式 (9)、(10), 可以对不同容量的并联电容补偿装置差压保护进行整定计算。设电容器组由额定电压 10.5 kV、额定容量 100 kvar 的单体电容器并联后 4 串 (即  $N=4$ ) 组成, 兼顾滤除 3 次谐波时电抗率  $\alpha$  取 0.12, 可靠系数取 1.3, 压互变比为 275, 计算结果见表 1。

表 1 不同容量下差压保护整定计算结果

Tab.1 The setting values of the difference voltage protection

安装容量 /kvar	$K$		不平衡 电压/V	整定值
	计算	取整		
1600	1.8	2.0	6084.1	17.0
2000	2.3	3.0	8217.1	23.0
2400	2.7	3.0	6084.1	17.0
2800	3.2	4.0	7554.9	21.1
3200	3.6	4.0	6084.1	17.0
3600	4.1	5.0	7206.5	20.2
4000	4.5	5.0	6084.1	17.0
4400	5.0	5.0	5264.2	14.7
4800	5.4	6.0	6084.1	17.0

显然, 当一组并联电容器中有多支以上的单体电容器发生故障后, 差压保护才能动作; 并联补偿支路的容量越大, 动作前故障的电容器越多。

### 1.3 存在问题

根据前述的推导易知故障后电抗率变化为:

$$\alpha' = \alpha \frac{N(M-K)}{N(M-K) + K} \quad (12)$$

则不同容量并联补偿支路电抗率在第一批单体电容器开路退出时的变化值见表 2。

表 2 不同容量下电抗率变化值 ( $K=1$ )

Tab.2 The values of reactance ratio under varies capacitor

安装容量 /kvar	volume ( $K=1$ )				
	1200	1600	2000	2400	2800
$\alpha'$	0.107	0.111	0.113	0.114	0.115
安装容量 /kvar	3200	3600	4000	4400	4800
$\alpha'$	0.116	0.116	0.117	0.117	0.117

显然, 当第一批单体电容器开路退出后, 并联电容补偿支路的电抗率略微下降并非常接近 3 次谐波的谐振点 (0.111)。电铁牵引负荷的 3 次谐波含量最高 (20% 左右), 此时并联电容补偿支路产生“谐振”的可能性将大大增加, 电容器发生大面积故障或“群爆”的危险也大大增加。

此外电容器组中必须有  $K$  支并联在一起的单体

电容器同时退出产生的不平衡电压才会启动差压保护, 如果故障电容器呈分散分布时, 比如上下半段各有一支单体电容器故障先后退出时, 不平衡电压反而下降, 差压保护无法动作, 长此以往, 势必造成更大范围的故障。

电力系统电容器多采用电抗率为1%的限流电抗器且负荷谐波含量很低, 因此直接采用电力系统电容器的差压保护算法对电铁电容器的正常运行极为不利。电铁并联电容补偿支路的正常运行能够提高功率因数、降低谐波影响、改善电压水平, 因此应提高电铁差压保护对电容器组内部故障的检出能力, 快速排除电容器内部故障, 提高运行安全性和稳定性。

## 2 改进算法

根据以上分析和实际运行经验, 当电铁电容器组中有一只电容器发生故障时差压保护应能准确动作切除故障。以此为整定原则, 我们对电铁差压保护的算法进行了调整。一般情况下电容器故障以开路为主, 在以下讨论中同样考虑了内部短路的情况。

### 2.1 按一支电容器开路退出进行整定

令  $K=1$  带入式 (10), 即得一支电容器开路退出产生的不平衡电压为:

$$\Delta U = \frac{U_M}{N(M-1)(1-\alpha)+1} \quad (13)$$

### 2.2 按一支电容器内部部分短路进行计算

一些电铁运营部门根据实际运营经验, 提出按单体电容器内部部分短路进行整定, 即: 每个单体电容器内部由于子元件先并后串组成, 考虑其中一支电容内部部分短路时 (如某段取内部故障率  $\beta=75\%$ ) 差压保护应可靠动作。

设单体电容器额定阻抗为  $X_{ce}$ , 故障后发生损害的元件阻抗变化为  $X'_{ce} = (1-\beta)X_{ce}$ , 阻抗减小; 则非故障侧半段阻抗为:

$$X_{C1} = -j \frac{\frac{N}{2} X_{ce}}{M} \quad (14)$$

故障侧半段阻抗为:

$$X_{C2} = -j \left( \frac{\frac{N-1}{2} X_{ce}}{M} + (1-\beta) X_{ce} \parallel \frac{X_{ce}}{M-1} \right) = -j \left( \frac{\frac{N-1}{2} X_{ce}}{M} + \frac{(1-\beta)}{M-M\beta+\beta} X_{ce} \right) \quad (15)$$

故障后并联电容补偿支路电流为:

$$I = \frac{U_M}{-jX_{ce} \left[ \frac{N-1-\alpha N}{M} + \frac{(1-\beta)}{M-M\beta+\beta} \right]} \quad (16)$$

则不平衡电压为:  $\Delta U = I(X_{C1} - X_{C2}) =$

$$-jX_{ce} I \left( \frac{\frac{N}{2}}{M} - \frac{(\frac{N}{2}-1)}{M} - \frac{(1-\beta)}{M-M\beta+\beta} \right) = \frac{\beta U_M}{(M-M\beta+\beta)(N-1-\alpha N)+M(1-\beta)} \quad (17)$$

### 2.3 结果比较

仍考虑单体电容器额定电压为 10.5 kV、额定容量 100 kvar,  $N=4$ , 兼顾 3 次谐波电流时  $\alpha$  取 0.12, 代入式 (13) 可得:

$$\Delta U = \frac{U_M}{3.52M-2.52} \quad (18)$$

由式 (17) 当一支单体电容器内部部分短路时有:

$$\Delta U = \frac{\beta}{2.52(M-M\beta+\beta)+M(1-\beta)} U_M \quad (19)$$

当  $\beta$  取不同值时, 有:

$$\Delta U = \frac{0.75}{0.88M+1.89} U_M, \quad \beta=75\% \quad (20)$$

$$\Delta U = \frac{0.5}{1.76M+1.26} U_M, \quad \beta=50\% \quad (21)$$

$$\Delta U = \frac{0.25}{2.64M+0.63} U_M, \quad \beta=25\% \quad (22)$$

不同电容器组安装容量的并联电容补偿装置在以上各种整定算法下产生的不平衡电压  $\Delta U$  计算结果及比较见图 2。

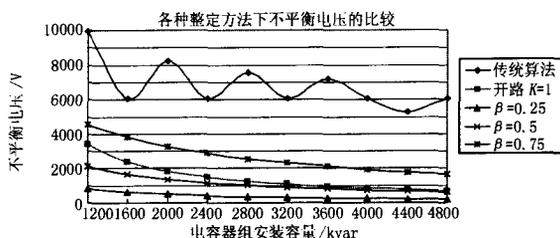


图 2 不同整定方法下  $\Delta U$  与电容器组安装容量的关系曲线 ( $U_{\text{额定}}=10.5 \text{ kV}$ ,  $\alpha=0.12$ )

Fig.2 The relative curves of  $\Delta U$  with capacitor volume under varies setting methods ( $U_{\text{额定}}=10.5 \text{ kV}$ ,  $\alpha=0.12$ )

分析图 2 可以有以下结论:

- (1) 随着电容器组安装容量的增加, 单支电容器组故障造成不平衡电压  $\Delta U$  逐渐减小;
- (2) 随着电容器内部短路比例  $\beta$  的增加, 内部短路造成的不平衡电压  $\Delta U$  逐渐增加;
- (3) 单支电容开路造成的不平衡电压  $\Delta U$  相当于单支电容器内部短路 50% 时的影响。

综合以上计算结果, 考虑到电容器开路故障多于短路故障, 建议采用单支电容器开路退出运行造成的  $\Delta U$  作为差压保护的整定值。

### 3 影响差压保护的因素

根据以上分析, 并联电容补偿支路的技术参数还受单体电容器额定电压和滤波次数的影响。

#### 3.1 单体电容器额定电压

由式 (9), 传统整定方法下  $K$  值的计算与单体电容器额定电压有关, 而根据式 (13) ~ (22) 按单体电容器故障进行计算时  $\Delta U$  与单体电容器额定电压无关, 相同容量、不同单体电容器额定电压的电容器组的差压保护整定值相同。

近年来额定电压为 8.4 kV、额定容量为 100 kvar 的单体电容器也在广泛使用。在传统整定方法下, 不同单体电容器额定电压下  $\Delta U$  与电容器组安装容量的关系曲线见图 3。

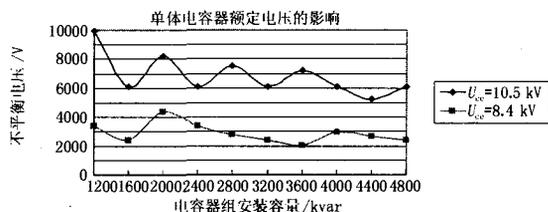


图 3 不同单体电容器额定电压下传统整定方法下  $\Delta U$  与电容器组安装容量的关系曲线

Fig.3 The relative curves of  $\Delta U$  with capacitor volume under varies capacitor unit rated voltage

单体电容器额定电压为 8.4 kV 时各种算法下不同整定方法下  $\Delta U$  与电容器组安装容量的关系曲线见图 4。

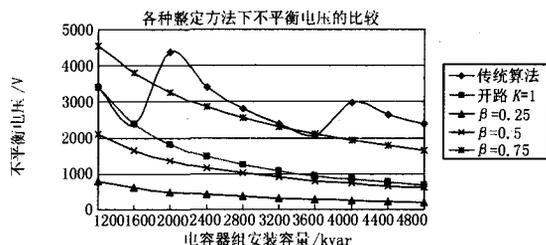


图 4 不同整定方法下  $\Delta U$  与电容器组安装容量的关系曲线 ( $U_{\text{UNITce}}=8.4 \text{ kV}, \alpha=0.12$ )

Fig.4 The relative curves of  $\Delta U$  with capacitor volume under varies setting methods ( $U_{\text{UNITce}}=8.4 \text{ kV}, \alpha=0.12$ )

比较图 4 中各种  $\Delta U$  计算结果可知: 对于由额定电压为 8.4 kV 的单体电容器组成的并联电容补偿装置, 取单支电容器开路退出运行造成的不平衡电压作为差压保护的整定值也是合适的。

#### 3.2 支路滤波次数

根据式 (9)、(17),  $\Delta U$  与并联电容补偿支路的电抗率  $\alpha$  有关, 但  $\alpha$  均出现在分母上且总是以  $(1 - \alpha)$  的形式出现。以一个安装容量为 4 000 kvar

的并联电容补偿支路 (单体电容器额定电压 10.5 kV) 为例, 不同滤波次数下不同整定方法的计算结果见表 3。

表 3 不同滤波次数下不同整定方法的计算结果

Tab.3 The setting results of various harmonic wave times under different setting methods

并补支路滤波次数	3	5	7	
电抗率 $\alpha$	0.12	0.05	0.02	
$1 - \alpha$	0.88	0.95	0.98	
传统方法	$K$	5	6	6
	$\Delta U/V$	6084	7783	7610
单支电容退出 $\Delta U/V$	841.5	781	758	
单支电容内部短路 $\Delta U/V$	$\beta=75\%$	1929	1778	1720
	$\beta=50\%$	729	674	652
	$\beta=25\%$	254	235	228

由表 3 可知, 对于改进算法, 随着滤波次数的增加, 不平衡电压略有下降, 影响较小。

对于兼滤 5 次谐波的并联电容补偿装置, 电抗率取 0.02, 不同整定方法下  $\Delta U$  与电容器组安装容量的关系曲线见图 5。

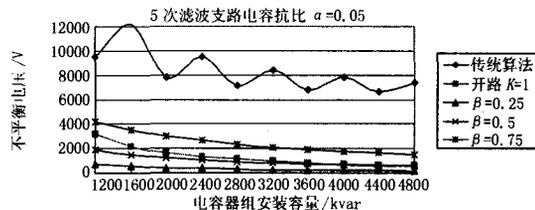


图 5 不同整定方法下  $\Delta U$  与电容器组安装容量的关系曲线 ( $U_{\text{UNITce}}=10.5 \text{ kV}, \alpha=0.05$ )

Fig.5 The relative curves of  $\Delta U$  with capacitor volume under different setting methods ( $U_{\text{UNITce}}=10.5 \text{ kV}, \alpha=0.05$ )

对比图 2 可知:

(1) 对于兼滤同一次数谐波的并联电容补偿装置, 随着安装容量的增加,  $\Delta U$  的变化规律基本相同;

(2) 与兼滤 3 次谐波的并联电容补偿装置的计算结果相比, 随着谐波次数的增加, 传统算法的  $\Delta U$  增加较多, 而改进算法下的  $\Delta U$  均有所下降, 下降的幅度较小;

(3) 对于兼滤 5 次谐波的并联电容补偿装置而言, 取单支电容器开路退出运行造成的  $\Delta U$  作为差压保护的整定值也是合适的。

### 4 结束语

本文对电气化铁道并联电容补偿装置差压保护算法进行了分析, 得出电力系统常用的电容器差压

(下转第 16 页 continued on page 16)

$\times Z_{01}$ ; 测量阻抗  $Z=U_0/I_0$ 。

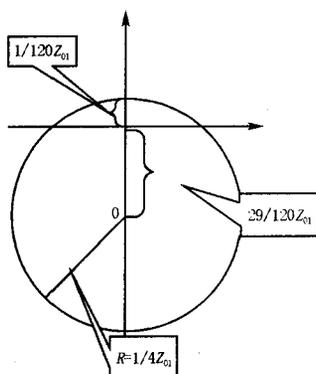


图 5 零序阻抗保护特性圆

Fig.5 Zero-sequence impedance protection feature circle

### 3 结束语

由上述分析可知, WDK-600 微机电抗器保护装置采用新的匝间保护原理, 动作可靠性高; 在电抗器匝间故障时能可靠动作, 而在各种非正常工况下运行都不会误动。

(上接第 13 页 continued from page 13)  
保护算法并不适用电铁并联电容补偿装置, 根据对比分析建议取单支电容器开路退出运行造成的不平衡电压作为差压保护的整定值来快速排除故障, 以防故障扩大, 提高牵引供电系统运行质量和经济效益。

#### 参考文献

- [1] 曹建猷. 电气化铁道供电系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.  
CAO Jian-you. Power System of Electrification Railway[M]. Beijing: China Railway Press, 1983.
- [2] GB 50227-95, 并联电容器装置设计规范[S]. 1995.  
GB 50027-95, Design Code for Parallel Capacitor Equipment[S]. 1995.
- [3] GB 50062-92, 电力装置的继电保护和自动装置设计规范[S]. 1992.  
GB 50062-92, Design Code for Relay Protection and Automatic Device of Power System[S]. 1992.

本文着重介绍了 WDK-600 微机电抗器保护装置匝间保护的基本原理, 为保护装置的定检提供了参考依据。

#### 参考文献

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理及应用, (第 2 版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.  
WANG Wei-jian. Relay Protection of Electrical Main Equipment Their Principle and Application, Second Edition[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [2] 王维俭, 黄润铿. 500 kV 并联电抗器零序功率方向保护的运行分析[J]. 继电器, 1995, 23(4): 3-5.  
WANG Wei-jian, HUANG Run-keng. Operational Analysis of 500 kV Shunt Reactor Zero- sequence Power Directional Protection [J]. Relay, 1995, 23(4):3-5.

收稿日期: 2006-12-08; 修回日期: 2006-12-19

作者简介:

汪希伟 (1981-), 男, 助理工程师, 从事电力系统继电保护工作。E-mail: tod21cn@sina.com

- [4] DL/T 584-95 3~110 kV, 电网继电保护装置运行整定规程[S].  
DL/T 584-953~110kV, Operational and Setting Code for Relay Protection of Electrical Power Networks[S].
- [5] WHA-2 微机综合自动化装置[R]. 成都: 交大许继电气公司, 2002.  
WHA-2 Integrated Sutomatic Device Based Microprocessor[Z]. Chengdu: Jiaoda-Xuji Electric Corp, 2002.

收稿日期: 2007-02-06; 修回日期: 2007-04-04

作者简介:

周晓东 (1967-), 男, 高级工程师, 研究方向为牵引供电系统; E-mail: east.eastdawn@gmail.com

张长梅 (1972-), 女, 工程师, 研究方向为牵引供电系统;

楚振宇 (1971-), 男, 高级工程师, 研究方向为牵引供电系统。

欢迎投稿 欢迎行阅 欢迎刊登广告