

文章编号: 1674—8247(2010)03—0031—04

# 铁路 20 kV 长距离输电线路工频过电压的研究

张海山

(北京交通大学, 北京 100044)

**摘 要:** 近年来,随着苏州工业园区率先应用 20 kV 电压供电,我国多个省市电业部门正着手规划和实施简化城市电网电压等级的方案。减少电压层次,大范围推广 20 kV 的配电电压,这对于铁路电力系统供电方案的选择,将产生巨大的冲击和影响。本文针对铁路电力系统 20 kV 长距离输电线路的工频过电压问题,进行了初步的分析与研究,提出区间设固定容量电抗器和配电所设动态无功补偿相结合的解决方法与措施。

**关键词:** 铁路 20 kV; 工频过电压; 电抗器

中图分类号: U223.5<sup>+</sup>1 文献标识码: A

## Research on Power Frequency Overvoltage of 20 kV Long Distance Transmission Line of Railway

ZHANG Hai-shan

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** In recent years, several provinces and cities in China have planned or already implemented the simplification of voltage grade for city grid after the 20 kV power has been supplied in Suzhou industrial park. Reducing voltage levels and widely expanding the distribution of 20 kV will bring huge impacts and effects on the selection of power supply proposals for railway power system. Referring to the power frequency overvoltage of 20 kV long distance transmission line, this article, through preliminary analysis and research, puts forward the solution by setting fixed capacity reactor in section with which dynamic reactive compensation in substation is associated.

**Key words** railway 20 kV; power frequency overvoltage; reactor

### 1 绪论

20 kV 标称电压具有:总投资低、供电半径大、供电容量大、供电质量高、总占地小、线损率低、管理环节简捷、有色金属使用量减少等优点,这些都是 35 kV 及 10 kV 共同配电所不具备的优点<sup>[4]</sup>。它在国外发达国家及第三世界国家得到了广泛应用并取得了良好成效。目前我国正在使用和试点使用 20 kV 输电线路的轨道交通项目有:上海轨道交通、地铁和轻轨等,实际运行情况良好。

### 2 提出问题

《最新电力工程标准规范实用全书》中规定:额定电压 10 kV 架空线路输送功率 3 000 kW 以下、输电距离为 15~5 km;额定电压 10 kV 架空线路输送功率 5 000 kW 以上、输电距离为 10 km 以下。而《铁路电力设计规范》规定一般条件下铁路 10 kV 变配电所间距为 40~60 km,受电源条件限制时自动闭塞电力线路允许延长到 70 km。长输电线路中由于存在纵向电感,当分布电容引起的电流流过这些纵向电感时就会产生电压升高。这在地方电网的 20 kV 配电系统的较短线路中不是问题,但是对于铁路最大单臂供电距离达到 80 km 甚至更长的轻轨线路,工频过电压是不容忽视的。20 kV 输电线路与高压输电线路有所不同,

收稿日期: 2010-06-11

作者简介: 张海山(1975-),男,在读硕士,工程师。

照搬高压输电线路的工频过电压数据是行不通的, 故研究 20 kV 输电线路的工频过电压问题成为一个全新的课题。

### 3 电容效应工频过电压分析

空载长线电容效应(费兰梯效应): 输电线路具有电感、电容等分布参数特性。在工频电源作用下, 远距离空载线路由于电容效应逐步积累, 使沿线电压分布不相等, 末端电压最高。相关文章对空载线路末端电压升高的理论已经进行了深入的分析, 本文不再赘述。下面主要对 20 kV 空载架空线路和电缆线路由于电容效应产生的工频过电压进行系统分析。

#### 3.1 架空线路电容电流引起工频过电压的分析

##### 3.1.1 架空线路对地等值电容

依据电力系统三相输电线路等效电容基础理论<sup>[2]</sup>, 三相架空线距离地面有一定高度  $h$ , 大地将影响导线周围的电场。三相架空线路导线  $a$ 、 $b$ 、 $c$  上分别载有电荷  $Q_a$ 、 $Q_b$ 、 $Q_c$ 。在静电场可采用镜像法计算求得每相平行于地面带电导体线路的对地等效电容为:

$$C = \frac{Q_a}{V_a} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\frac{2h}{r}} \quad (\text{F/m}) \quad (1)$$

式中:  $\epsilon$  ——空气介质常数,  $\epsilon = \frac{10^{-9}}{36\pi}$  (F/m);

$h$  ——架空线平均对地高度 (m);

$r$  ——架空导线半径 (m)。

##### 3.1.2 架空线路电容电流的计算

架空线对地电容电流可以采用下式求得:

$$I_c = \sqrt{3}\omega C_0 U L \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中:  $I_c$  ——对地电容电流 (A);

$U_e$  ——系统额定线电压 (kV);

$C_0$  ——单相对地电容 (F/km);

$L$  ——架空线路的长度 (km)。

##### 3.1.3 某配电所 20 kV 纯架空出线电容电流和电压计算

通过 (2) 式计算求得某配电所不同线型、不同长度 20 kV 纯架空出线电容电流和对应电容电压, 假设该线路额定电压 20 kV、导线排列方式为三角形排列、导线材质 LGJ-95、架空线路平均距地  $h = 10$  m、导线半径  $r = 0.0069$  m、未计算导线电阻产生的电压降, 仅计算电容电压, 故取  $R = 0$ 。配电所出线电缆部分电容电流为 3 A。依据 (2) 式和欧姆定律  $U = (R + jX)IX = 1/(\omega C)$ 、单导线架空线路等效电纳  $b = 2\pi fC = \omega C$ , 求得该配电所 20 kV 纯架空出线的电容电流和电压如表 1 所示。

表 1 某配电所 20 kV 纯架空出线电容电流和电压

架空出线总长度 (km)	电容电流 (A)		电容电压 (V)	
	LGJ-70	LGJ-95	LGJ-70	LGJ-95
10	6.9	6.91	1190	2608
20	7.79	7.8	1343	2943
30	8.7	8.7	1500	3283
40	9.6	9.6	1655	3623
50	10.5	10.5	1810	3962
60	11.4	11.4	1966	4302
70	12.3	12.3	2121	4642
80	13.2	13.2	2276	4981
90	14.1	14.1	2431	5321
100	15	15	2586	5660
120	16.8	16.8	2897	6340
140	18.6	18.6	3207	7019
160	20.4	20.4	3517	7698
180	22.2	22.2	3828	8377
200	24	24	4138	9057

#### 3.2 电缆线路电容电流引起工频过电压的分析

##### 3.2.1 电缆的电容 (部分内容引自《铁路工程设计手册·电力》P322)<sup>[1]</sup>

三芯电力电缆电容分布结构如图 1 所示, 电缆导体之间、导体与电缆外皮之间均存在电容。电缆电容分布示意图如图 1 所示, 正常情况下电缆电容电流的等效电路如图 2 所示。

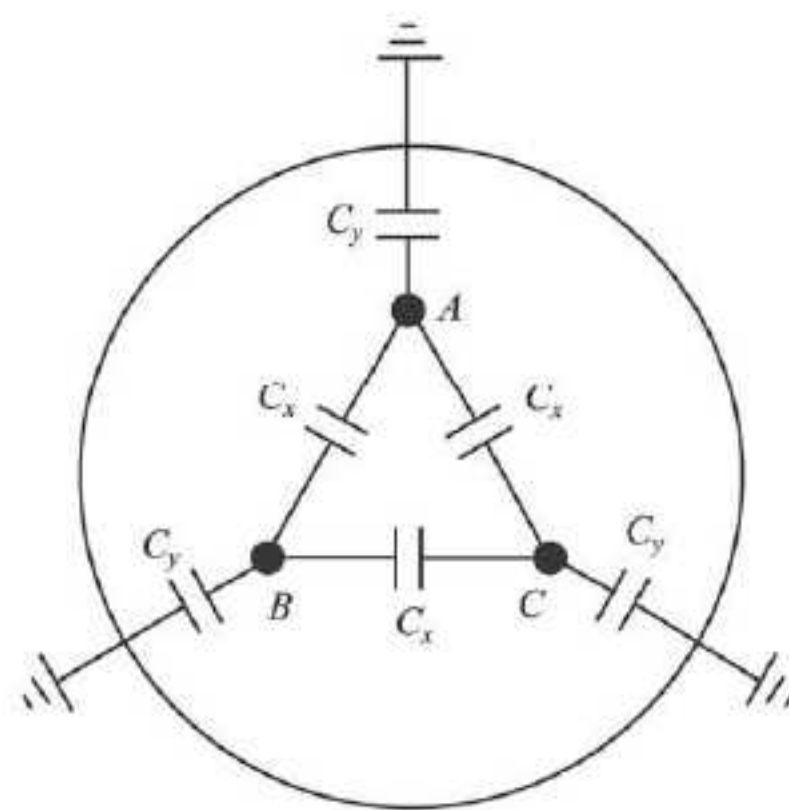


图 1 电缆电容分布示意图

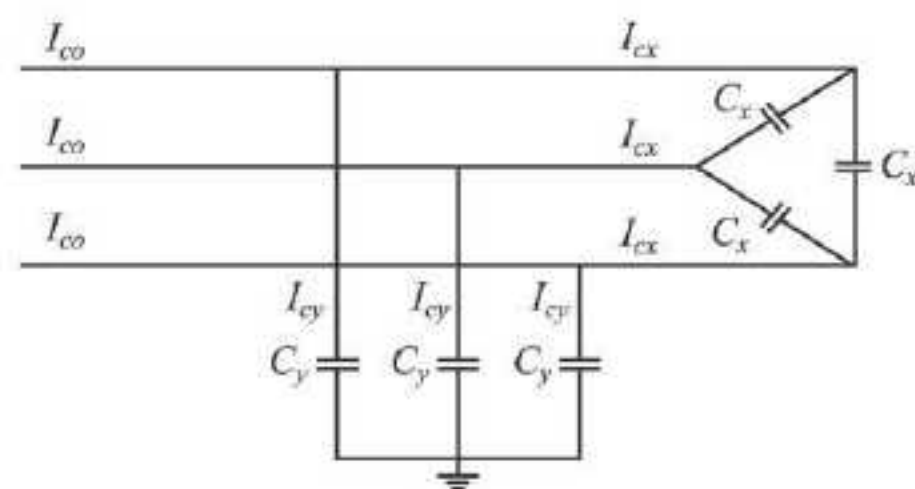


图 2 正常情况下电缆电容电流的等效电路图

设单位长度电缆导体之间的电容为  $C_x$  (F/km), 单体与电缆外皮 (铝包) 之间的部分电容为  $C_y$  (F/km); 则单芯对中性点的电容为  $C = C_y + 3C_x$  (F/km)。

电缆线路的每相等值电容可以采用 (3) 式求得:

$$C = \frac{Q_a}{V_a} = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln\frac{r_2}{r_1}} \quad (\text{F/m}) \quad (3)$$

式中:  $\epsilon_0$  ——空气介质常数,  $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$  (F/m);

$\epsilon_r$  ——电缆绝缘材料相对介电常数;

$r_1$  ——电缆导线半径 (m);

$r_2$  ——电缆外皮内半径 (m)。

### 3.2.2 正常情况时的电容电流

电缆线路正常情况 (未接地) 时的电容电流分布如图 3 所示。

单相电容电流为:

$$I_\omega = I'_{cx} + I_{cy} = 3\omega C_x L U_\phi + \omega C_y L U_\phi = \omega (C_y + 3C_x) L U_\phi = \omega C L U_\phi \quad (4)$$

式中:  $I_{cx}$  ——线间电容电流 (A);

$I'_{cx}$  ——由线间电容电流合成的线电容电流 (A);

$I_{cy}$  ——线对地电容电流 (A);

$I_\omega$  ——线路始端的电容电流 (A);

$\omega$  ——角速度,  $\omega = 2\pi f = 314$  (rad/s);

$L$  ——电缆长度 (km);

$U_\phi$  ——相电压 (V);

$U_L$  ——线电压 (V)。

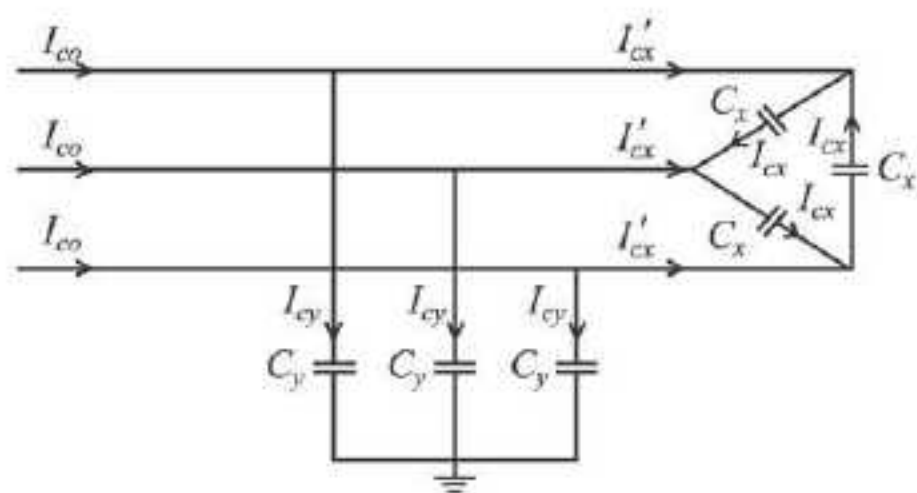


图 3 正常情况时电容电流分布

### 3.2.3 某配电所 20 kV 纯电缆出线电容电流和电压计算

通过 (4) 式和欧姆定律求得某配电所不同线型、不同长度 20 kV 纯电缆出线电容电流和电容电压如表 2 所示 (电缆线芯电容取  $C_{70} = 207$  pF/m,  $C_{95} = 228$  pF/m, 注各电缆厂生产的电缆线芯电容不尽相同, 具体数值以电缆厂家提供数值为准)。

### 3.3 工频过电压

《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合 (DL/T 620—1997)》中通常取系统正常送电状态下甩负荷和在线路受端有单相接地故障情况下甩负荷作为确定系统工频过电压的条件<sup>[3]</sup>, 本文数据按正常送电、空载运行条件进行计算。该标准规定 3~10 kV 和 35~66 kV 系统工频过电压水平一般分别不超过  $1.1\sqrt{3}p.u.$

表 2 某配电所 20 kV 纯电缆出线电容电流和电压表

电缆出线总长度 (km)	电容电流 (A)		电容电压 (V)	
	70	95	70	95
10	22.5	24.8	34 616	34 641
20	45	49.6	69 233	69 281
30	67.5	74.4	103 849	103 922
40	90	99.2	138 466	138 563
50	112.5	124	173 082	173 204
60	135	148.8	207 699	207 844
70	157.5	173.6	242 315	242 485
80	180	198.4	276 932	277 126
90	202.5	223.2	311 548	311 767
100	225	248	346 164	346 407
120	270	297.6	415 397	415 689
140	315	347.2	484 630	484 970
160	360	396.8	553 863	554 252
180	405	446.4	623 096	623 533
200	450	496	692 329	692 815

和  $\sqrt{3}p.u.$ , 并未对 20 kV 工频过电压的条件进行规定。我们可以取 3~10 kV 和 35~66 kV 系统的平均值为  $1.05\sqrt{3}p.u.$ 。通过以上数据不难发现, 空载架空线路和电缆线路均存在工频过电压, 导线电容电压随导线截面和长度增加而增大, 而且, 截面相同时, 电缆线路电容电压远远大于架空线路的电容电压, 所以更应侧重于治理电缆线路的电容电压。

## 4 设置无功补偿装置

### 4.1 补偿原理

由 RLC 并联谐振理论 (又称电流谐振理论, 邱关源《电路》第 5 版 P291)<sup>[2]</sup> 可知, 当发生并联谐振时有  $I_L + I_c = 0$ , 无功功率  $Q_L + Q_c = 0$ , 即:

$$Q_L = \frac{1}{\omega_0 L} U^2 = Q_c = -\omega_0 C U^2 \quad (5)$$

式中:  $I_L, I_c$  ——感性电流、容性电流;

$Q_L, Q_c$  ——感性无功、容性无功。

(5) 式表明在谐振时, 电感的磁场能量与电容的电场能量彼此相互交换、完全补偿, 两种能量总和为一常数。

在线路空载、轻载和大量使用电力电缆时, 由于沿线分布电容的作用, 可能会因功率因数超前, 使功率因数角由正变负, 引起末端电压升高。电压上升会严重危及设备和系统的安全。为了保持输电线路的无功平衡, 特别是为了限制轻载负荷引起的电压升高, 根据并联谐振原理通常需要在线路送端和受端或其中一端装设固定高压并联电抗器来进行无功补偿。高压并联电抗器可以在线路带轻载负荷的情况下用于补偿线路的电容性充电电流, 吸收线路并联电容发出的无功功率, 减少过剩的无功功率, 限制系统电压升高、保证线路可靠运行。

## 4.2 区间就地设置并联电抗器

一般说来补偿级数(即补偿装置的分组数量)越高补偿的精度越高,但随着补偿级数的增加,装置的成本会大幅度提高。综合考虑补偿精度、成本、箱体体积等因素,同时顾及到补偿装置不集中设置更便于线路分段停电或检修时都能得到恰当的补偿、客运专线和高速铁路区间每隔 3 km 左右有一处负荷点,每处负荷点设有电力远动箱变一座便于在箱式变电站中设置补偿装置等条件。故通常做法是 10 kV 线路沿线每隔 10 ~ 20 km 根据各段电缆长度在箱式变电站高压侧设一组固定容量电抗器进行容性无功补偿。

通过电缆线路单相电容电流计算公式  $I_{\omega} = \omega CLU_{\phi}$  和单相电容无功功率计算公式  $Q_1 = \omega CLU_{\phi}^2$ , 可以看出电容电流与电压  $U$ 、电容无功功率与  $U^2$  成正比例增长关系。故对于相同容量电抗器, 20 kV 电缆线路的补偿间隔要小于 10 kV 线路; 或相同补偿间隔, 20 kV 电缆线路电抗器补偿容量要大于 10 kV 线路的电抗器补偿容量。

## 4.3 并联电抗器容量计算

以 20 kV 电力电缆为例 (YJV<sub>22</sub> - 12/20kV - 3 × 70,  $L = 5$  km) 计算并联电抗器的容量。

### 4.3.1 单相电容电流

$$I_{\omega} = \omega CLU_{\phi} = 314 \times (0.207 \times 10^{-6}) \times 5 \times (20 \times 1.05 \times 10^3 \div 1.732) = 3.94 \text{ (A)}$$

### 4.3.2 单相电容无功功率

$$Q_1 = \omega CLU_{\phi}^2 = 3.94 \times (20 \times 1.05 \times 10^3 \div 1.732)^2 = 47\,771.36 \text{ (Var)}$$

### 4.3.3 三相容性无功功率

$$Q_c = 3Q_1 = 3 \times 47\,771.36 = 143\,314 \text{ (Var)}$$

### 4.3.4 按照 75% 的补偿度计算并联电抗器的容量

$$Q_L = 0.75 \times 3\omega CLU_{\phi}^2 = 0.75 \times 143\,314 / 1\,000 = 107.49 \text{ (kVar)}$$

故采用 125 kVar 电抗器。

### 4.3.5 电抗器补偿后的残留校验计算

《铁路电力设计规范》(TB 1008-2006) 8.4.5 条规定,长电缆线路电容电流值超过隔离开关的分和能力时,宜采用电抗器进行补偿,容性电流的补偿度宜在 50%~75% 的范围内,补偿后的电容电流不应超过 5 A。

电抗器电感电流  $I_L = S_e / (3 \cdot U_{\phi})$  ( $S_e$  为电抗器额定功率)。

$$I_L = 125\,000 / (3 \times 20 \times 1.05 \times 10^3 / 1.732) = 1.1456 \text{ (A)}$$

补偿后电容电流  $3.94 - 1.1456 = 2.794 < 5 \text{ (A)}$ , 满足上述规定。

## 4.4 电力配电所集中设置动态无功补偿装置

普速铁路配电所一般采用静止补偿电容器,但是对长电缆或全电缆线路的客运专线和高速铁路仅在配电所设置静止补偿电容器或静止补偿电抗器都是不适合的。因为设置静止补偿器不可避免会出现过补偿或欠补偿状态,过补偿会引起电压升高、欠补偿会导致感性负荷引起电压降低;铁路变配电所从地方变电站接引外电源,规范要求高压侧功率因数补偿至 0.9~1,区间贯通线上设置的固定电抗器补偿部分容性无功,但固定电抗器容量不可调,无法满足功率因数的补偿精度要求。故在长电缆或全电缆线路的客运专线和高速铁路配电所贯通、自闭调压器的原边母线上设置动态无功补偿装置可以根据负荷状况动态投入运行,大大提高铁路系统的电压稳定性和配电网电能质量的综合指标,改善系统的动态和静态品质。

## 5 结论

在铁路供电系统因贯通线供电距离长、沿线负荷小等特殊造成线路分布电容较大,特别是近几年随着客运专线和城际铁路等高标准铁路大量使用电缆线路,而电缆线路对地电容是架空线路的几十倍,导致工频电压升高和功率因数降低。工频过电压会对用电设备产生严重损坏、空载切断线路时会引起操作过电压、功率因数角  $\varphi$  超前由正变负造成正常运行时无功向电网倒送影响送电经济性。铁路供电系统在区间箱式变电站设置固定数量电抗器补偿线路电容电流和在车站配电所设置动态无功补偿装置全线无功功率进行综合调解,能够对线路无功功率起到很好的改善作用。在对铁路引入 20 kV 电压等级的可行性方案进行充分论证的基础上,实行 20 kV 电压等级仍然有一些基础性的技术问题如:线路的绝缘问题、电能质量问题、供电能力问题、继电保护问题、铁路配电所无功补偿方式、中性点运行方式等需要进行深入研究。

限于个人水平及时间仓促,本文如不妥和错误之处希望读者予以批评指正;中铁二院专家对本文提出宝贵的修改意见,谨致以衷心的感谢。

## 参考文献:

- [1] 曾鼎刚,胡幸.关于简化电压等级试行 110/20 kV 降压系统和 20 kV 配电网的建议[J].湖北电力,1996,20(4):12-13.
- [2] 邱关源.电路[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [3] 铁道部专业设计院.铁路工程设计手册·电力[M].北京:中国铁道出版社,1991.
- [4] DL/T 620-1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].