

特高压交流输电线路电磁环境研究

黄道春¹, 阮江军¹, 文武¹, 李昊星², 赵全江³, 郑伟³

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北省武汉市 430072; 2. 华北电网有限公司电力调度中心, 北京市宣武区 100053; 3. 中南电力设计院, 湖北省武汉市 430071)

Study on Electromagnetic Environment of UHV AC Transmission Lines

HUANG Dao-chun¹, RUAN Jiang-jun¹, WEN Wu¹, LI Hao-xing², ZHAO Quan-jiang³, ZHENG Wei³

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China;
2. Power Dispatching Center, North China Grid Company Limited, Xuanwu District, Beijing 100053, China;
3. Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan 430071, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The study on electromagnetic environment of UHV AC power transmission is of significance for the construction of UHV AC transmission lines in China. By means of successive images method, the authors calculate the electric field intensity at the conductor surface of single circuit 1000kV AC transmission lines which are erected on cup-shaped and compact tower and that of double circuit on the same tower as well as the electric field intensity at the height of one meter above the ground where is beneath the transmission line. The corona loss, radio interference, audible noise, the minimum distance to the ground of conductor and the corridor width of 1000 kV AC transmission line adopting above mentioned types of towers are also calculated, the variations of corona loss, radio interference and audible noise with altitude above sea level are analyzed. Research results show that approximately, the corona loss exponentially increases with the increase of altitude above sea level and also approximately, the radio interference linearly increases with the increase of altitude above sea level, and by means of choosing suitable line parameters the requirement of UHV AC transmission line in electromagnetic environment index can be satisfied.

KEY WORDS: UHV AC power transmission; electromagnetic environment; successive images method; electric field intensity; corona loss; radio interference; audible noise

摘要: 研究特高压交流输电电磁环境问题对我国特高压工程建设具有重要意义。采用逐次镜像法计算酒杯塔、紧凑型 and 同塔双回直线塔的 1000 kV 交流输电线路导线表面和线路下方距地面 1 m 水平线处的电场强度; 计算了 3 种塔型下特高压交流输电线路的电晕损耗、无线电干扰、可听噪声、导线最低对地距离和走廊宽度; 分析电晕损耗、无线电干扰和可听噪声随海拔变化的情况。结果表明通过选择合适的线路

参数可满足特高压交流输电电磁环境指标要求, 电晕损耗随海拔有近似指数增加的变化规律, 无线电干扰随海拔有近似线性增加的变化规律。

关键词: 特高压交流输电; 电磁环境; 逐次镜像法; 电场强度; 电晕损耗; 无线电干扰; 可听噪声

0 引言

国外实践和国内研究经验表明, 特高压交流线路可实现远距离、大容量输电, 减少线路回数, 节省线路走廊, 降低损耗, 有利于建立坚强的电网和解决短路电流过大超过开关容量极限的问题^[1-7]。为缓解输电容量日益提高和线路走廊日趋紧张的问题, 更好地实现“西电东送”和“全国联网”, 将特高压交流线路作为全国电网的主网架是十分必要的^[8-11]。国家电网公司已委托中国工程院、中国电力科学研究院等多家科研机构开展了特高压输电关键技术的研究, 在借鉴国外研究经验的基础上取得了丰硕的成果^[1]。晋东南—南阳—荆门 1000kV 交流输电工程已确定为我国特高压交流输电示范工程^[9,12], 并于 2006 年 8 月 19 日在山西省长治市开工建设, 对我国未来电网规划、设备制造、运行控制等具有重要指导意义。

随着社会环保意识的增强, 人们对输电线路电磁环境问题越来越重视。确定线路下方电场效应、无线电干扰和可听噪声等电磁环境参数成为输电线路设计的关键问题之一^[3,13-19]。因此开展 1000kV 特高压交流输电线路电磁环境研究具有重要意义。

本文采用逐次镜像法计算典型单回酒杯塔和紧凑型塔、同塔双回直线塔 1000kV 交流输电线路

导线表面电场强度和线路下方距地面 1m 水平线上的电场强度;按电磁环境控制指标确定导线最低对地高度和线路走廊宽度;讨论了不同海拔下的电晕损耗、可听噪声和无线电干扰。最后分析这 3 种塔型的电磁环境参数是否满足限值要求,旨在给我国特高压交流输电线路设计提供参考。

1 特高压交流输电线路基本参数

特高压交流线路额定线电压为 1 000 kV,最高运行电压取 1 100 kV^[1]。文献[20]分析表明我国特高压导线可采用截面为 400~630 mm² 的导线,本文取 LGJ-630/45 型号八分裂导线进行分析^[5,21],子导线正多边形排列,分裂间距 0.4 m。避雷线型号为 LH_BGJ-120/70,弧垂均取 18 m。单回酒杯塔、紧凑型塔^[13,21]和同塔双回直线塔的相导线排列方式如图 1 所示。

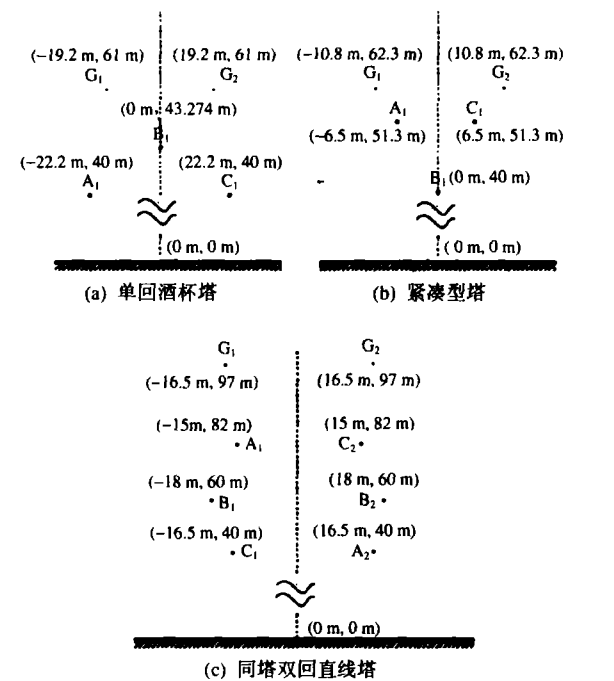


图 1 相导线在杆塔上的布置
Fig. 1 Phase conductors configuration on the tower

2 工频电场强度

2.1 计算方法及条件

逐次镜像法是计算导线表面电场强度的较好方法^[22-24]。镜像次数取决于导线间的最小距离与导线半径之比,比值越大,所需镜像次数越少;当比值大于 10 时,镜像 1 次就能使计算误差小于 0.2%^[23]。对于第 1 节的线路参数,分裂间距与导线半径之比接近 24,计算中只进行 1 次镜像即可满足工程要求。对于线路下方距地面 1 m 处的电场强度

因水平分量近似为 0,可用计算导线表面电场强度时求得的镜像电荷直接计算。

计算导线表面电场强度时采用导线平均对地高度,即杆塔处导线高度减去 2/3 导线弧垂,计算距地面 1 m 处电场强度时采用导线最低对地高度。

2.2 导线表面工频电场强度

在每根分裂导线圆周表面每隔 6°取点,比较一根导线上所有点的场强 $E_{\theta}(\theta$ 为导线表面圆周角度),得到单根导线场强的最大值 $E_{\theta\max}$,取一相所有导线 $E_{\theta\max}$ 的平均值作为该相导线的平均电场强度最大值 $\bar{E}_{\theta\max}$ ^[21]。取一相 8 根子导线上所有点的场强平均值作为该相导线的平均电场强度 \bar{E}_{θ} ,3 种塔型的相导线的 $\bar{E}_{\theta\max}$ 和 \bar{E}_{θ} 如表 1 所示。

表 1 3 种塔型的相导线 $\bar{E}_{\theta\max}$ 和 \bar{E}_{θ}

Tab. 1 Phase conductor's $\bar{E}_{\theta\max}$ and \bar{E}_{θ} for different tower

相导线	单回酒杯塔		紧凑型塔		同塔双回直线塔	
	$\bar{E}_{\theta\max}/$ (kV/cm)	$\bar{E}_{\theta}/$ (kV/cm)	$\bar{E}_{\theta\max}/$ (kV/cm)	$\bar{E}_{\theta}/$ (kV/cm)	$\bar{E}_{\theta\max}/$ (kV/cm)	$\bar{E}_{\theta}/$ (kV/cm)
A ₁	14.345	11.685	17.441	14.205	15.179	12.364
B ₁	15.292	12.455	17.471	14.230	15.249	12.420
C ₁	14.345	11.685	17.441	14.205	15.388	12.534
A ₂	—	—	—	—	15.388	12.534
B ₂	—	—	—	—	15.249	12.420
C ₂	—	—	—	—	15.179	12.364

分析表 1 数据可知,3 种塔型下 $\bar{E}_{\theta\max}$ 均低于导线临界起晕场强^[25]。但紧凑型塔的 $\bar{E}_{\theta\max}$ 和 \bar{E}_{θ} 比酒杯塔的 B₁ 相约大 14.25%,比 A₁、C₁ 相约大 21.57%,酒杯塔和同塔双回直线塔的场强数值比较接近。可见相导线距离对导线表面电场强度影响很大,因此确定相导线距离时在满足绝缘特性的前提下也应适当考虑其对导线表面场强的影响。 $\bar{E}_{\theta\max}$ 可用于计算无线电干扰和可听噪声, \bar{E}_{θ} 可用于计算电晕损耗。

2.3 线路下方距离地面 1 m 处工频电场强度

在线路下方距地面 1 m 处水平线上 100 m 范围内每隔 0.062 5 m 取 1 点,比较所有点的电场强度 E 得到场强最大值 E_{\max} 。按线路经公路和居民区场强控制在 7 kV/m、农田区控制在 10 kV/m,人烟稀少非农田区控制在 12~15 kV/m 的原则确定导线最低对地高度 H ^[1,5-6,14,16,18],按场强小于 4 kV/m 的标准确定线路走廊宽度 w ^[6,25]。3 种塔型在不同电场强度控制指标下的导线最低对地高度和线路走廊宽度见表 2。

分析表 2 数据可知,不同 E_{\max} 控制指标下紧凑型塔的 H 和 w 均小于酒杯塔和同塔双回直线塔,其杆塔高度可以降低,走廊占地面积可以减小,工程造价大大减小,可见其优越性。而同塔双回线路从

表 2 3 种塔型在不同电场强度控制指标下的 H 和 w
Tab. 2 H and w under different electric field intensity control criteria for different tower

E_{\max} 控制指标/ (kV/m)	酒杯塔		紧凑型塔		同塔双回直线塔	
	H /m	w /m	H /m	w /m	H /m	w /m
7	27.3	93.375	22.9	29.625	24.7	70.125
10	21.8	96.250	18.6	33.875	20.6	72.875
12	19.4	96.500	16.6	35.625	18.4	73.375
15	16.7	96.000	14.5	37.875	16.0	73.250

输电容量角度考虑也优于酒杯塔。实际线路建设中需根据线路经过的地区确定 H 和 w ，在满足工程要求的前提下尽量降低成本。

2.4 导线不同高度下电场强度分布曲线

酒杯塔、紧凑型塔和同塔双回直线塔在不同 H 下的电场强度分布曲线，如图 2 所示。由图 2 可见，3 种塔型的 6 条曲线在低场强区基本相同，在高场

强区差异显著， H 越小， E_{\max} 变化越大。

3 电晕损耗

3.1 电晕损耗计算

电晕与导线表面平均电场强度、天气条件和空气密度等因素密切相关。而电晕放电直接影响着无线电干扰和可听噪声。采用文献[25]提供的方法进行计算。根据不同天气状况下的电晕损耗曲线，计算每相导线在良好天气、雨天、雪天和雾凇天产生的功率损失，将相导线的功率损失相加得到总的年电晕损耗。不同天气条件下的年计算小时数如表 3 所示。

本文重点分析海拔不同时电晕损耗的变化趋势，因此选取一种典型的天气条件计算，不进行天气修正，实际计算时应根据具体天气情况进行修正。

表 3 不同天气条件的年计算小时数
Tab. 3 Calculation hours per year for different kind of weather

天气条件	良好天	雪天	雨天	雾凇天
年计算小时数/h	7 824	480	320	96

3.2 电晕损耗随海拔的变化

3 种塔型在不同海拔下的电晕损耗如表 4 所示。分析表 4 数据可知，电晕损耗随海拔变高逐渐增大，海拔等间距增加时，电晕损耗差值逐渐增大。相同海拔处，紧凑型塔的电晕损耗最大，酒杯塔的电晕损耗最小。原因是紧凑型塔导线的表面场强大于酒杯塔和同塔双回直线塔，可见导线表面场强直接影响着电晕放电。

表 4 典型海拔下的电晕损耗

Tab. 4 Corona loss of typical altitude for different tower

海拔/m	电晕损耗/(W/m)		
	酒杯塔	紧凑型塔	同塔双回直线塔
0	13.83	41.50	35.42
500	17.21	52.44	44.50
1000	21.79	64.50	55.88
1500	26.92	80.02	68.76
2000	34.03	98.61	86.11
2500	42.37	129.47	109.50
3000	53.68	166.75	136.66

电晕损耗随海拔有近似指数的变化规律，海拔越高电晕损耗增加越快。原因是海拔增加，空气密度降低导致导线临界起晕场强 E_0 减小，以同塔双回直线塔为例给出 A_1 、 B_1 、 C_1 三相导线表面场强最大值 E_m/E_0 随海拔变化的曲线，如图 3 所示。

可以看出，3 条曲线的变化规律基本相同， E_m/E_0 随海拔呈线性增加的规律。如果以 $E_m/E_0=0.85$ 为标准，酒杯塔和同塔双回直线塔在海拔 0~3 000 m

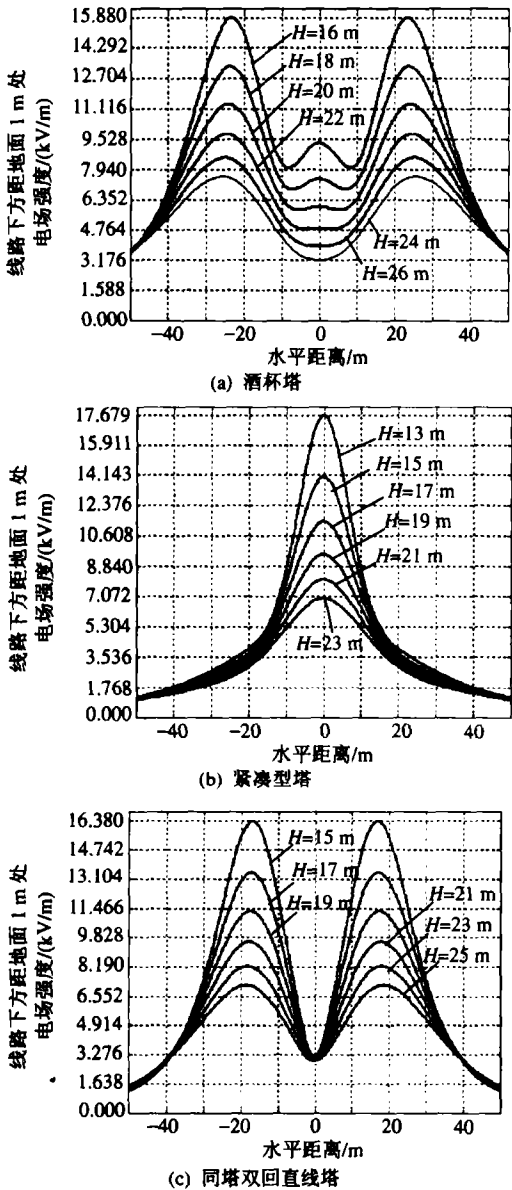


图 2 H 不同时 E 分布曲线

Fig. 2 Distribution curves of E under different H

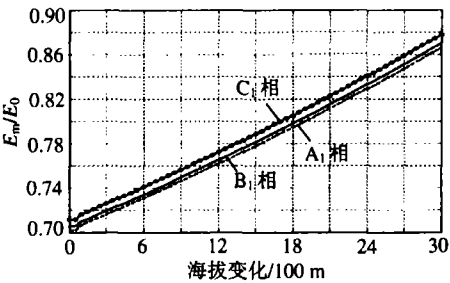


图 3 E_m/E_0 随海拔变化的曲线
Fig. 3 Variation curve of E_m/E_0 with altitude

范围内均符合要求,低海拔地区半径可以减小,以降低成本;而紧凑型塔在 1 000 m 以下时 E_m/E_0 可满足要求,在 1 600 m 以上 E_m/E_0 就为 0.9 左右,在 3 000 m 附近 E_m/E_0 已接近 1,说明 E_m/E_0 偏大,此时应考虑增大导线半径或增加分裂导线根数。

4 无线电干扰

4.1 无线电干扰水平计算方法

无线电干扰是特高压交流线路电磁环境的一个重要参数,是指水平距离最边相导线 20m、距地面 2m 处,频率为 0.5 MHz 的无线电干扰估计值。美国西屋电力公司 (Westinghouse electric corporation)通过对多条高压运行线路、试验线路的测量和实验室研究总结出良好天气下 750 kV 交流输电线路无线电干扰水平的经验计算公式^[26]

$$E_{RI} = 48 + 3.5(\bar{E}_{\theta_{max}} - 17.5) + 30\lg(d/3.51) + 20\lg(30.7 H/D^2) + 10(1 - f) + 40(1 - \delta/\delta_0) \quad (1)$$

式中: d 为子导线直径, cm; D 为参考点距导线的直线距离, m; f 为参考频率, 本文取 0.5 MHz; δ 为高海拔空气相对密度; δ_0 为标准大气压下空气相对密度。

式(1)为由单回线路总结出的经验公式,对于同塔双回线路,6 相导线中每相导线产生的无线电干扰水平按单回线路计算,并将同名相产生的干扰场强几何相加^[27-28],即

$$E_{RI,i} = 20\lg[(10^{E_{RI,i1}/20})^2 + (10^{E_{RI,i2}/20})^2]^{1/2} \quad (2)$$

式中: $E_{RI,i1}$ 为第 1 回第 i 相导线在参考点处干扰场强, dB; $E_{RI,i2}$ 为第 2 回第 i 相导线在参考点处干扰场强, dB。

我国电力行业标准 DL/T691-1999^[28]推荐了好天气下 50%无线电干扰计算方法(国标法),文献[25]给出了 95%无线电干扰计算方法(手册法)。2 种方法适合于 500 kV 及以下电压等级线路,是否适合 1 000 kV 线路还有待讨论,且不能有效考虑海拔的

影响,而西屋电力公司的计算方法可用于计算 750 kV 线路,电压等级更接近 1 000 kV,且可有效考虑海拔的影响,用这种方法计算的不同海拔下的无线电干扰如表 5 所示,用手册法和图标法计算的无线电干扰如表 6 所示。

表 5 西屋电力公司计算的典型海拔下的无线电干扰
Tab. 5 Radio interference of typical altitude by Westinghouse electric corporation

海拔高度/m	酒杯塔	紧凑型	同塔双回直线塔
0	39.91	48.49	43.40
500	41.90	50.48	45.39
1 000	43.81	52.39	47.30
1 500	45.65	54.23	49.14
2 000	47.42	56.00	50.91
2 500	49.11	57.69	52.60
3 000	50.74	59.32	54.23

表 6 手册法和国标法计算的无线电干扰
Tab. 6 Radio interference calculated by handbook method and state standard method

线路	无线电干扰/dB		
	酒杯塔	紧凑型塔	同塔双回直线塔
手册法(95%)	51.79	60.51	54.79
国标法(50%)	35.40	42.60	38.64

分析表 5、6 数据可知,国标法计算值小于西屋电力公司的计算值,而手册法计算值大于西屋电力公司的计算值。西屋电力公司的计算值在理论上更有参考意义,当然还需结合我国实际情况进行验证。

文献[1,16]研究表明我国 1 000 kV 交流线路的无线电干扰限值为 55 dB,而文献[5,6,27]认为无线电干扰限值应选择 58 dB,实际上在靠近居民区处可选低值,在人烟稀少处可选高值。如以 55 dB 为标准,3 种塔型的无线电干扰在海拔 1 500 m 以下均可满足要求,而紧凑型线路在海拔 1 500 m 以上不满足要求,需要适当增加导线半径或增多分裂导线根数^[17];以 58 dB 为标准,3 种塔型在海拔 2 500 m 以下均可满足要求,而酒杯塔和同塔双回直线塔还有很大的裕度,紧凑型线路适当增加导线半径或增多分裂导线根数也可满足要求。

4.2 无线电干扰水平随海拔的变化

分析表 5 数据可知,无线电干扰水平随海拔呈近似线性的变化规律。3 种塔型在海拔每增加 500 m 时,无线电干扰增加值最大为 1.99 dB(0~500 m),最小为 1.63 dB(2 500~3 000 m),因此该规律只是在 0~3 000 m 范围内近似满足。

5 可听噪声

可听噪声也是电磁环境的一个重要参数,对于

特高压交流线路, 它是指水平距最边相导线 20 m, 距地面 0.5 m 处的声压。采用美国邦纳维尔电力局 BPA 在实际试验线路上通过长期实测数据推导得出的预测公式, 计算的 50% 累计百分声级^[27]为

$$N_{SLA} = 10 \lg \sum_{i=1}^z \lg^{-1} [(P_{WL_i} - 11.4 \lg R_i - 5.8) / 10] \quad (3)$$

式中: N_{SLA} 为 A 计权声级; z 为相数; P_{WL_i} 为第 i 相导线的声功率级; R_i 为参考点与导线的直线距离, m。声功率级 P_{WL} 的计算公式为

$$P_{WL} = -164.4 + 120 \lg \bar{E}_{\theta_{max}} + 55 \lg d_{eq} \quad (4)$$

式中 d_{eq} 为导线等效直径, mm, $d_{eq} = 0.58 n^{0.48} d$, n 为分裂根数($n > 4$), d 为子导线直径, mm。

文献[1,5,6,16,27]认为我国特高压交流输电可听噪声限值取为 55 dB(A), 如按 1.5~2.0 dB(A)/km 进行海拔修正^[29], 酒杯塔在海拔 0~3 000 m 范围内可满足要求, 同塔双回直线塔在海拔 1 000 m 以上将不满足要求, 而紧凑型塔完全不满足要求。按 Perry 准则^[16,27], 对于可听噪声在 59 dB(A) 以上有大量投诉; 对 52.5~59 dB(A) 有少量投诉, 52.5 dB(A) 以下时无投诉, 因此有理由认为我国特高压交流输电可听噪声限值取为 55 dB 有点偏低, 虽然可以达到, 但相对于我国西北 750 kV 交流线路的限值有些苛刻^[29], 尤其是在高海拔地区更为明显。对全线大部分不满足该要求的线路可通过选择半径较大的导线, 或适当增多导线分裂根数来满足要求^[27]。实际上在靠近居民区处可选低值, 而人烟稀少地区可适当放宽要求。可通过特高压交流示范工程投运后积累的运行经验进行具体分析, 以确定最佳的限值。

6 结论

(1) 提出用美国西屋电力公司的方法计算我国 1 000 kV 交流线路的无线电干扰, 分析了海拔对无线电干扰的影响, 该公司的算法在考虑海拔影响方面具有一定优越性。

(2) 线路下方最大电场强度可通过选择合适的导线最低对地距离来满足场强控制指标; 无线电干扰和可听噪声可通过选择大半径导线或适当增加分裂导线根数来满足要求; 高海拔地区导线不满足 E_m/E_0 控制标准时, 应适当增大导线半径。

(3) 酒杯塔可满足各项电磁环境控制指标, 特别是高海拔地区也完全满足, 低海拔地区还可减小导线半径, 但其线路走廊宽度较大。

(4) 同塔双回直线塔也可较好地满足电磁环

境控制指标, 但在海拔 1 000 m 以上时可听噪声将不满足 55 dB 限值的要求, 此时需要适当增加导线半径; 从输电容量角度考虑其线路走廊相对于酒杯塔有一定的优越性。

(5) 紧凑型塔在海拔 2 500 m 以上不满足无线电干扰 58 dB 限值要求, 完全不满足可听噪声 55 dB 限值要求, 但由于其对地距离和线路走廊宽度的优越性, 不能忽略它的突出优点, 可适当增大导线半径和增多导线分裂根数使其满足电磁环境各项指标要求, 且在低海拔地区使用, 将有很好的经济性。

(6) 电晕损耗随海拔高度有近似指数增加的变化规律, 无线电干扰随海拔高度有近似线性增加的变化规律。

参考文献

- [1] 舒印彪, 刘泽洪, 袁骏, 等. 2005 年国家电网公司特高压输电论证工作综述[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 1-12.
Shu Yinbiao, Liu Zehong, Yuan Jun, et al. A survey on demonstration of UHV power transmission by State Grid Corporation of China in the year of 2005[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 1-12(in Chinese).
- [2] 吴敬儒, 徐永禧. 我国特高压交流输电发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 1-4.
Wu Jingru, Xu Yongxi. Development prospect of UHV AC power transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 1-4(in Chinese).
- [3] 周浩, 余宇红. 我国发展特高压输电中一些重要问题的讨论[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 1-9.
Zhou Hao, Yu Yuhong. Discussion on several important problems of developing UHV AC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 1-9(in Chinese).
- [4] 张运洲. 对我国特高压输电规划中几个问题的探讨[J]. 电网技术, 2005, 29(19): T11-T14.
- [5] 舒印彪. 1 000 kV 交流特高压输电技术的研究与应用[J]. 电网技术, 2005, 29(19): T1-T6.
- [6] 舒印彪. 我国特高压输电的发展与实施[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 1-8.
Shu Yinbiao. Development and execution of UHV power transmission in China[J]. Electric Power, 2005, 38(11): 1-8(in Chinese).
- [7] 谷定燮. 我国发展特高压输电的前景[J]. 高电压技术, 2002, 28(3): 28-30, 40.
Gu Dingxie. The prospect of developing UHV transmission system in China[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(3): 28-30, 40(in Chinese).
- [8] 郭强, 张运洲, 吕健. 我国未来同步电网的构建研究[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 14-18, 60.
Guo Qiang, Zhang Yunzhou, Lü Jian. Study on scheme for structure and construction of synchronous power grid in China from 2010 to 2020[J]. Power System Technology, 2005, 29(22): 14-18, 60(in Chinese).
- [9] 张运洲, 吕健. 我国未来同步电网的战略构想[J]. 中国电力, 2006, 39(3): 5-7.

- Zhang Yunzhou, Lü Jian. Strategic conception of future synchronous power network in China[J]. Electric Power, 2006, 39(3): 5-7(in Chinese).
- [10] 张文亮, 胡毅. 发展特高压交流输电, 促进全国联网[J]. 高电压技术, 2003, 29(8): 20-22, 31.
- Zhang Wenliang, Hu Yi. To develop UHV AC power transmission and advance the united power network in China[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(8): 20-22, 31(in Chinese).
- [11] 张文亮, 吴维宁, 胡毅. 特高压输电技术的研究与我国电网的发展[J]. 高电压技术, 2003, 29(9): 16-18.
- Zhang Wenliang, Wu Weining, Hu Yi. Research on UHV transmission technology and development of power network in China[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(9): 16-18(in Chinese).
- [12] 张晓莉, 周泽昕, 王玉玲, 等. 1000kV 交流输电系统动态建模研究[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 1-4.
- Zhang Xiaoli, Zhou Zexin, Wang Yuling, et al. Study on dynamic simulation of 1000kV AC power transmission system[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 1-4(in Chinese).
- [13] 邵方殷. 我国特高压输电线路的相导线布置和工频电磁环境[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 1-7.
- Shao Fangyin. Phase conductor configuration and power frequency electromagnetic environment of UHV transmission lines in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 1-7(in Chinese).
- [14] 吴桂芳, 陆家榆, 邵方殷. 特高压等级输电的电磁环境研究[J]. 中国电力, 2005, 38(6): 24-27.
- Wu Guifang, Lu Jiayu, Shao Fangyin. Research on electromagnetic environment of the next voltage level of transmission system in China[J]. Electric Power, 2005, 38(6): 24-27(in Chinese).
- [15] 万保权, 邬雄, 杨毅波, 等. 750kV 变电站母线电磁环境参数的试验研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(3): 57-59, 71.
- Wan Baoquan, Wu Xiong, Yang Yibo, et al. Study on electromagnetic environment of bus in 750kV station[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(3): 57-59, 71(in Chinese).
- [16] 胡毅. 特高压输电试验线段及相关技术问题的探讨[J]. 高电压技术, 2004, 30(12): 37-39.
- Hu Yi. Discussion on test line and relevant technique of UHV transmission[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(12): 37-39(in Chinese).
- [17] 万保权, 邬雄, 刘涤尘, 等. 西北 750 kV 输电线路的无线电干扰研究[J]. 高电压技术, 2003, 29(3): 41, 58.
- Wan Baoquan, Wu Xiong, Liu Dichen, et al. Study on the radio interference of 750 kV northwest transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(3): 41, 58(in Chinese).
- [18] 邬雄. 1000 kV 交流输电线路电磁环境的研究[J]. 电力设备, 2005, 6(12): 24-27.
- Wu Xiong. Study on electromagnetic environment for 1000kV AC power transmission line[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(12): 24-27(in Chinese).
- [19] 毛文奇, 刘海燕, 徐华, 等. 特高压输电对环境影响的讨论[J]. 电力建设, 2004, 25(8): 54-56.
- Mao Wenqi, Liu Haiyan, Xu Hua, et al. Discussion about impact of EHV transmission on environment[J]. Electric Power Construction, 2004, 25(8): 54-56(in Chinese).
- [20] 陈勇, 万启发, 谷莉莉, 等. 关于我国特高压导线和杆塔结构的探讨[J]. 高电压技术, 2004, 30(6): 38-41.
- Chen Yong, Wan Qifa, Gu Lili, et al. Discussions on UHV conductors and tower structure in China[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(6): 38-41(in Chinese).
- [21] 黄道春, 阮江军, 余世峰, 等. 特高压紧凑型输电线路工频电场强度计算[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 69-71.
- Huang Daochun, Ruan Jiangjun, Yu Shifeng, et al. Calculation of the power frequency electric field intensity of UHV compact transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7): 69-71(in Chinese).
- [22] 孙才华, 宗伟, 李世琼, 等. 一种较准确的分裂导线表面场强计算方法[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 92-96.
- Sun Caihua, Zong Wei, Li Shiqiong, et al. A more accurate calculation method of surface electric field intensity of bundled conductors[J]. Power System Technology, 2006, 30(4): 92-96(in Chinese).
- [23] IEEE Corona and Field Effects Subcommittee Report. Radio Noise Working Group. A survey of methods for calculating transmission line conductor surface gradients[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979, PAS-98(6): 1996-2007.
- [24] Huang Weigang. Study on conductor configuration of 500 kV chang-fang compact line[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(3): 1002-1008.
- [25] 国家电力公司东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [26] IEEE Radio Noise Subcommittee Report. Comparison of radio noise prediction methods with CIGRE/IEEE survey results[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1973, PAS-92(3): 1029-1042.
- [27] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [28] DL/T691-1999, 高压架空送电线路无线电干扰计算方法[S].
- [29] 吕世荣, 刘本粹. 750 kV 输变电工程关键技术研究[J]. 中国电力, 2006, 39(1): 1-6.
- Lü Shirong, Liu Bencui. Studies on key-technologies of 750 kV transmission and transformation project[J]. Electric Power, 2006, 39(1): 1-6(in Chinese).
- 收稿日期: 2006-10-20.
- 作者简介:
- 黄道春(1976—), 男, 博士研究生, 研究方向为电磁场数值计算及其工程应用, E-mail: huangd99@163.com;
- 阮江军(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电磁场数值计算及电磁兼容等方面的研究工作;
- 李昊星(1980—), 男, 本科, 从事华北电网的继电保护工作。
- (责任编辑 马晓华)

特高压交流试验基地带电成功

2006年12月30日12:00, 国家电网公司特高压交流试验基地供电系统一次带电成功, 特高压交流试验基地建设由此跨入了一个崭新阶段。试验基地的送电成功, 为基地整体带电投运并全面开展特高压各类科研、试验创造了条件, 必将对推进特高压输电技术应用, 实现建设以特高压电网为重点、各级电网协调发展的宏伟战略目标发挥重要作用。