

共走廊架设超/特高压输电线路 电场分布及走廊优化研究

石超群¹ 朱军¹ 吴静文¹ 吴驰² 吴广宁¹ 邱璆¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要:超/特高压线路共用走廊架设时,由于导线数目多,电压等级不同,所以影响电场分布的因素较多,为了分析超/特高压输电线路共用走廊架设时线路下方的电场分布,基于等效电荷法建立了共用走廊时工频电场的计算模型,利用Matlab编制计算程序,仿真分析了共用走廊时输电线路下方距离地面1.5 m处的电场分布。重点讨论了超/特高压输电线路的相序排列、接近距离以及导线最小对地高度对整个输电走廊电场分布的影响。研究表明超/特高压共用走廊时导线的相序排列和导线最小对地高度对场强最大值有较大影响,高场强覆盖区域与接近距离成线性增长关系。结合电磁环境评估标准,提出了超/特高压共用走廊架设时建议采用的相序布置,接近距离和导线最小对地高度。

关键词:等效电荷法; 共用走廊; 工频电场; 相序布置; 接近距离; 对地高度

Abstract: The number of conductor with different voltage level is more complicated than single circuit when EHV and UHV transmission lines are erected in the common corridor, so there are many factors which will influence the distribution of electric field. The calculation model of power - frequency electric field is established based on charge equivalent method in order to analyze the distribution of electric field when using the common corridor, and Matlab is utilized to develop simulation program for the visible analysis of electric field distribution under the transmission lines at 1.5 m above the ground. The discussion lays emphasis upon some influencing factors to the distribution of electric field in the transmission corridor, such as the phase sequence of EHV and UHV transmission lines, the approaching distance between EHV and UHV transmission lines, and the clearance of conductor to the ground. Research shows that the phase sequence and the clearance of conductor to the ground have a great influence on the maximum of electric field, and there is a linear growth relationship between high - intensity coverage area of electric field and the approaching distance. Finally, the suggested phase sequence, approaching distance and clearance of conductor to the ground when EHV and UHV transmission lines are erected in the common corridor are proposed according to the criterion of electromagnetic environmental evaluation.

Key words: charge equivalent method; common corridor; power - frequency electric field; phase sequence arrangement; approaching distance; clearance of conductor to the ground

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013)04 - 0001 - 05

国内外实践和研究经验表明,特高压交流输电线路可以实现远距离、大容量输电,有利于建立坚强的电网。中国的能源、负荷中心分布极不均衡,能源主要分布在西部,而电力需求主要在东部发达地区,为缓解能源与负荷不均衡这一矛盾,更好地实现“西电东送”和“全国联网”,将特高压线路作为全国电网的主网架是十分必要的^[1-4]。

随着特高压输电线路的建设,在经济发达且土地资源紧张的地区,势必出现超高压线路与特高压线路平行架设甚至共用走廊的情况,由于输电线路走廊费用占线路建设投资的比例呈上升趋势,目前

走廊费用占静态投资的比例达20%甚至更高,所以输电线路走廊的优化会直接影响工程造价,而且影响输电走廊宽度的重要因素之一就是电场分布^[5-6]。超/特高压共用走廊架设时,输电线路下方的电磁环境更为复杂。文献[7]对高压输电线路的电磁环境限值标准进行了相关探讨,指出线路跨越农田时,工频电场不超过10 kV/m;线路临近民房时,房屋所在位置离地1.5 m处的最大未畸变场强不超过4 kV/m,并以此电场限值作为输电线路走廊宽度计算的参考值。文献[8-10]对超、特高压交流线路单独架设时电场分布的影响因素做了一定研究,然而对超高压与特高压线路共走廊架设时线路

的电场分布以及走廊宽度的研究还很少。

下面利用等效电荷法,通过数值仿真,分析了超/特高压共用走廊架设时导线相序排列,导线的架设高度以及线路接近距离对电场分布和走廊宽度的影响,研究结果可以为工程实际提供理论依据。

1 等效电荷法计算电场

等效电荷法是以镜像法为基础,理论依据还是场的唯一性定理:是把导体表面不均匀且连续分布的电荷用其内部一组等效电荷来代替。只要这组电荷能保证原来给定的边界条件不变,就能用这组等效电荷求出全场域的解^[11]。等效电荷的位置和形状是由导体的形状和对场的定性分析所设置,而电荷值则可由给定的边界条件求出。等效电荷法可用于计算高压电极、高压输电线和其他高压电器附近的高压电场。

计算多导线线路中导线上的等效电荷,可写出矩阵方程为

$$[U] = [P][Q] \quad (1)$$

其中, $[U]$ 为各导线上电压列向量,由输电线上的电压和相位决定; $[Q]$ 为各导线上等效电荷的列向量; $[P]$ 为多导线系统的电位系数矩阵组成的 n 阶方阵 (n 为导线的数目),矩阵中的各元素由导线自身参数及空间位置决定。

由于 $[U]$ 和 $[P]$ 是已知量,通过矩阵变换即可求出 $[Q]$,然后可以求出空间中任一点 (x, y) 处的电场强度为

$$E_x = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_i^n \left(\frac{x - x_i}{L_i^2} - \frac{x - x_i}{L_i'^2} \right) \quad (2)$$

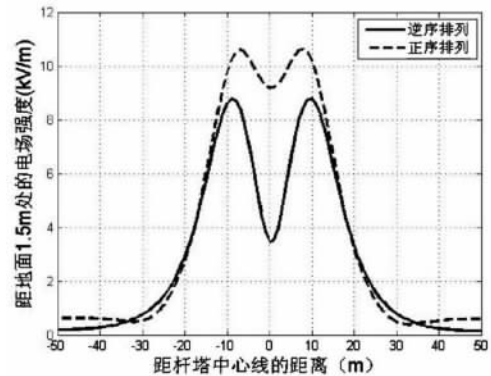
$$E_y = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_i^n Q_i \left(\frac{y - y_i}{L_i^2} - \frac{y + y_i}{L_i'^2} \right) \quad (3)$$

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (4)$$

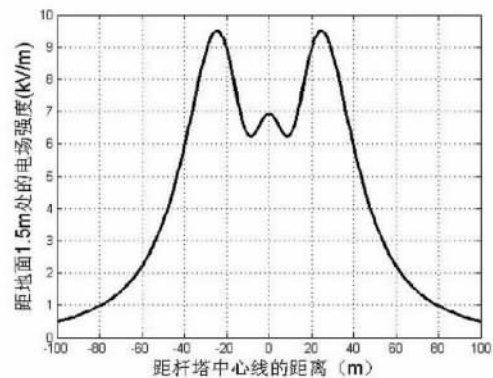
其中 E_x 为空间任一点电场水平分量; E_y 为空间任一点电场垂直分量; x_i 和 y_i 为第 i 相导线的空间坐标; L_i, L_i' 分别为空间任一点到第 i 相导线的距离和到第 i 相导线镜像的距离。

利用等效电荷法,采用 Matlab 编制计算程序,分别仿真了超高压及特高压线路单独架设时线路的电场分布,如图 1 所示,500 kV 同塔双回输电线路单独架设和 1 000 kV 特高压输电线路单独架设时

电场分布曲线呈马鞍形,与文献 [12 - 14] 结果相符,500 kV 同塔双回输电线路采用逆相序排列与同相序排列相比,场强最大值从 10.62 kV/m 减小到 8.77 kV/m,减小约 17.5%。



(a) 500kV 同塔双回单独架设时线路下方电场分布



(b) 1000kV 特高压单回单独架设时线路下方电场分布

超高压及特高压线路单独架设时线路的电场分布

2 仿真模型的建立

超/特高压线路共用走廊架设时,各回路首先要满足单独架设时的线路参数要求。交流超高压线路选取同塔双回 500 kV 线路,导线型号为 LGJ - 400/35,导线采用 4 分裂,分裂间距为 0.5 m^[15],底相导线水平间距为 18 m,中相导线水平间距为 22 m,上层导线水平间距为 15 m,中相导线与底相导线垂直间距为 10.6 m,上层导线与底相导线垂直间距为 22 m^[16],计算时线电压取 525 kV;交流特高压线路选取 1 000 kV 单回水平排列,导线型号为 LGJ - 630/35,导线采用 8 分裂,分裂间距为 0.4 m^[17],导线相间距为 22.2 m,计算时线电压取 1 050 kV。 d 表示超/特高压线路杆塔中心线的接近距离。由于避雷线对输电线路下方电场分布的影响很小^[18],所以在仿真时没有考虑避雷线的作用。超/特高压线路共

用走廊架设时的示意图如图2所示。

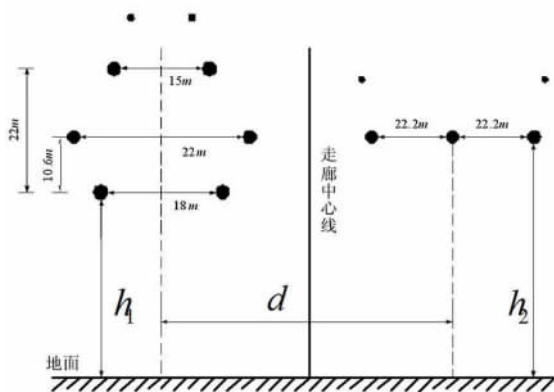


图2 超/特高压线路共用走廊示意图

3 同塔双回500 kV相序对电场分布的影响

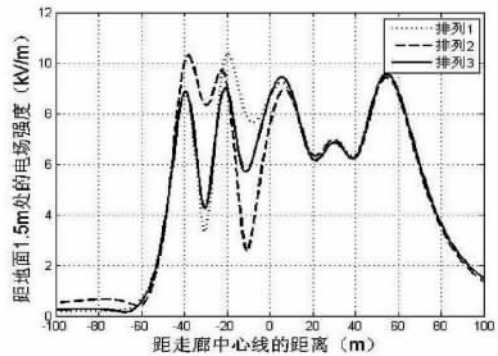
如图2所示,接近距离 $d = 60\text{ m}$ 。保持特高压线路的相间距不变,导线的最小对地高度取 22 m ,导线相序从左至右依次为 A、B、C;保持超高压线路导线的相对位置不变,底相导线的最小对地高度取 11 m ,位于杆塔中心线左侧回路导线相序从上至下依次为 A、B、C,改变位于杆塔中心线右侧回路导线的相序 ρ 种相序排列方式如表1所示,距地面 1.5 m 处的电场仿真结果如图3所示。

表1 超、特高压共用走廊架设时的相序排列和场强最大值

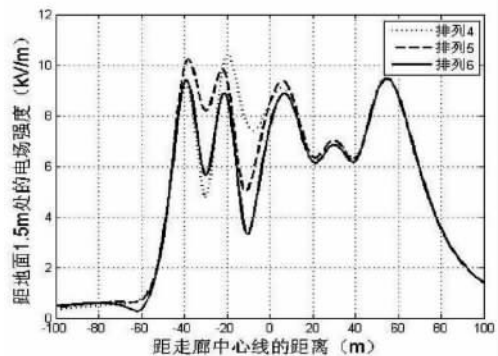
序号	相序排列	场强最大值 / ($\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)
排列1	A c	ABC
	B b	
	C a	
排列2	A a	ABC
	B b	
	C c	
排列3	A c	ABC
	B a	
	C b	
排列4	A b	ABC
	B c	
	C a	
排列5	A b	ABC
	B a	
	C c	
排列6	A a	ABC
	B c	
	C b	

(注:500 kV 线路导线相序命名原则为左侧回路从上至

下,右侧回路从下至上;1 000 kV 线路导线相序命名原则是从左至右)



(a) 排列为1、2、3相序时线路下方电场分布



(b) 排列为4、5、6相序时线路下方电场分布

图3 不同相序时线路下方电场分布

由表1可以看出,排列3和排列6时,输电走廊的场强最大值小于其他4种排列方式,且可以使整个走廊场强的最大值控制在 10 kV/m 的限值范围。

排列1时,500 kV 同塔双回超高压线路是逆相序排列,此时输电线路下方场强应是最小的,但是由于其右侧回路 a 相位于最下方,与特高压 A 相的作用增强,使场强最大值大于只有500 kV 线路单独作用时的最大场强,而且此时整个走廊的场强最大值超过 10 kV/m 的场强限值。

排列3到排列6,虽然500 kV 同塔双回超高压线路都是混相序排列,但是排列3和排列6时场强最大值小于排列4和排列5时的场强最大值,因为此时表1中标注阴影的3根导线的相位互不相同,电场的叠加作用最小。

排列6时,500 kV 同塔双回超高压线路是正相序排列,其两回 c 相位于最下方,超高压线路自身产生的场强最大值都已经很高 ($> 10\text{ kV/m}$),虽然由于特高压线路 A 相的作用,使超高压线路走廊内侧回路产生的场强有所削弱,但是场强最大值还是由超高压线路走廊外侧回路决定。

由以上综合分析可知,超/特高压共用走廊架设时,同塔双回超高压线路采用混相序,且使表1中标注阴影的三根导线相位互不相同,此种相序是最优相序。

6种相序排列方式下,高场强($>4\text{ kV/m}$)覆盖区域几乎没有变化,所以导线的相序排列方式对场强的最大值影响较大,对高场强覆盖区域影响很小,即导线的相序排列方式对输电线路走廊宽度的影响较小。

4 接近距离对电场分布的影响

选取与前文仿真所采用的同样的杆塔参数和线路参数,导线相序采用排列3,改变超高压线路与特高压线路杆塔中心线的接近距离 d ,接近距离从60m每间隔10m递增到120m,不同接近距离时的场

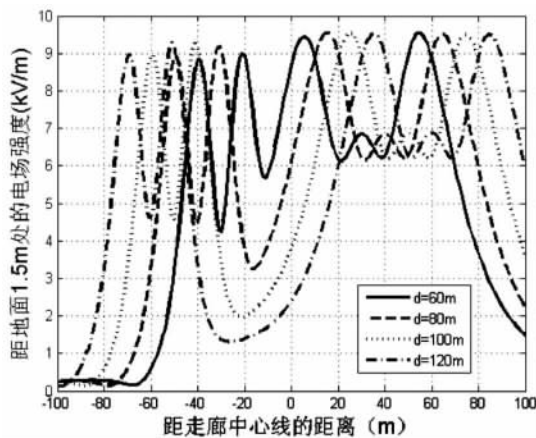


图4 不同接近距离时线路下方电场分布

强最大值与高场强覆盖区域列于表2。仿真结果如图4所示,图中绘制出了接近距离分别为60m、80m、100m、120m时的电场分布曲线。

表2 不同接近距离时的场强最大值和高场强覆盖区域

接近距离/m	场强最大值/($\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)	高场强覆盖区域/m
60	9.54	127
70	9.53	137
80	9.54	147
90	9.54	157
100	9.53	167
110	9.53	177
120	9.52	187

根据表2的数据绘制接近距离与高场强覆盖区域的曲线关系,如图5所示。

通过图4、表2和图5综合分析可以看出,随着接近距离的增加,场强最大值几乎没有变化,但是位

于两杆塔中心线之间的场强最小值显著减小,从 5.68 kV/m 减小到 1.31 kV/m ,这主要是由于交流电场衰减很快,随着接近距离的增加,电场的叠加作用明显减弱。

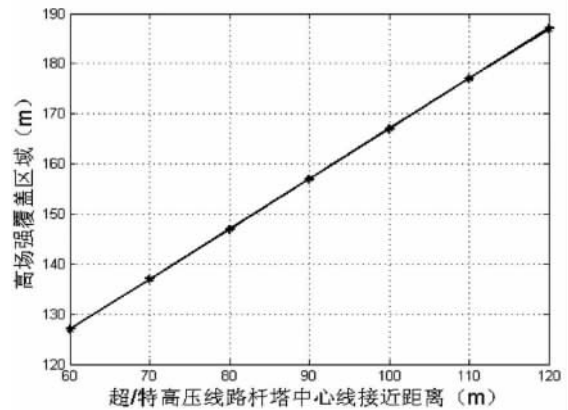


图5 接近距离与高场强覆盖区域的关系

高场强覆盖区域随着接近距离的增加成线性增长,当接近距离大于70m时,在两杆塔中心线之间会出现场强最大值小于 4 kV/m 的区域,但是该区域处于走廊内部,利用价值较小,所以在统计高场强覆盖区域时没有考虑。目前随着电力线路的不断增长,为了节约输电走廊,提高单位走廊输送功率,回路间的接近距离由原来的倒杆距离逐渐向安全间隙距离取值靠近,所以在满足线路绝缘的要求下,可以适当缩小回路的接近距离。

5 导线最小对地高度对电场分布的影响

保持超高压与特高压各回路的导线相对位置不变,特高压导线最小对地高度取22m,超高压线路与特高压线路的接近距离 d 取60m,改变超高压线路底相导线最小对地高度,不同导线对地高度时线路下方的电场分布如图6所示。

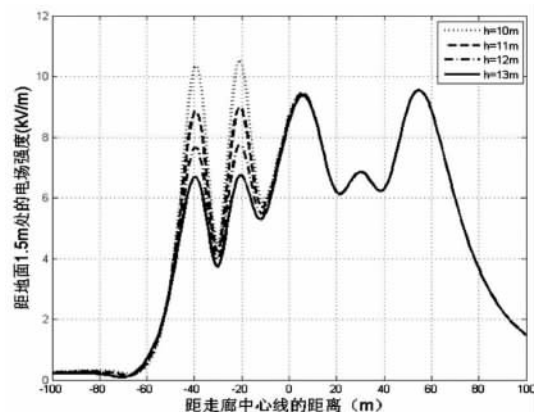
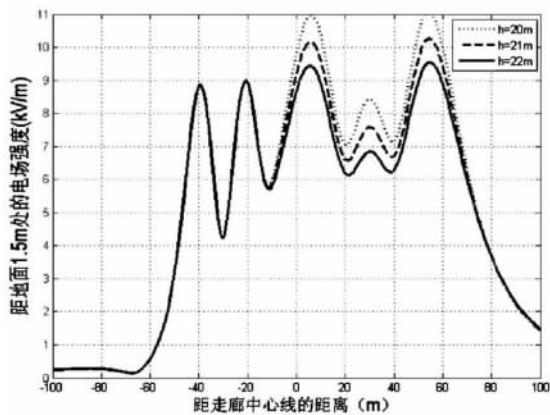


图6 超高压线路不同底相导线最小对地高度时电场分布

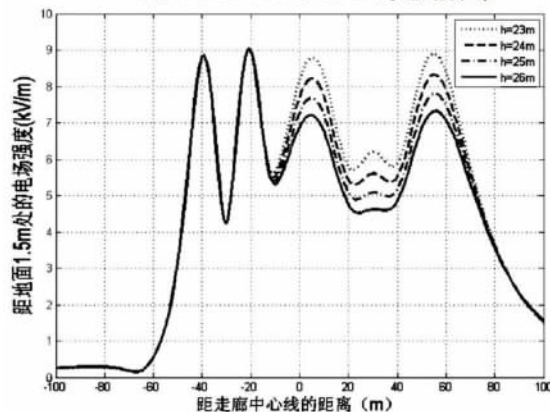
由图6可以看出,底相导线最小对地高度为10 m时,500 kV线路产生的场强最大值会大于10 kV/m,底相导线最小对地高度从11 m增加到13 m时,超高压侧的场强最大值显著减小,从9.00 kV/m减小到6.75 kV/m,但是整个走廊的场强最大值几乎不变。超高压线路底相导线最小对地高度的提高,对高场强覆盖区域的影响很小,高场强覆盖区域会有所减小,但是不明显。

保持超高压与特高压各回路的导线相对位置不变,超高压线路底相导线最小对地高度取11 m,超高压线路与特高压线路的接近距离 d 取60 m,改变特高压线路导线最小对地高度,不同对地高度时线路下方的电场分布如图7所示。

由图7可以看出,当特高压导线最小对地高度小于22 m时,整个输电走廊的场强最大值是由特高压线路产生的电场决定,特高压导线最小对地高度从23 m增加到26 m时,特高压侧的场强最大值从8.90 kV/m减小到7.35 kV/m,但是整个走廊的场强最大值几乎不变。同时,随着特高压线路导线最小对地高度的提高,高场强覆盖区域也几乎没有变化。



(a) 特高压线路导线最小对地高度为20、21、22、23 m时电场分布



(b) 特高压线路导线最小对地高度为24、25、26、27 m时电场分布

图7 特高压线路不同导线最小对地高度时的电场分布

6 结 论

(1) 超高压与特高压输电线路共走廊架设时,导线的相序排列会对走廊电场分布产生较大影响,对线路走廊宽度影响较小;同塔双回超高压线路采用混相序排列,特高压线路靠近走廊中心线的一回线路采用与超高压底相导线互不相同的相位,此种相序排列是能够使整个输电走廊场强满足限值标准的最优相序。

(2) 随着超高压与特高压线路接近距离的增大,输电走廊场强最大值基本不变,且高场强覆盖区域与接近距离成线性关系;在满足线路绝缘的要求下,可以适当减小线路间的接近距离,以达到缩小输电走廊宽度的目的;当超/特高压线路共走廊架设时,接近距离建议取70~90 m。

(3) 对于共走廊架设的超/特高压输电线路,走廊内地面电场最大值与导线最小对地高度有密切关系。当超/特高压共用走廊架设时,建议超高压线路地线导线最小对地高度大于11 m,特高压导线最小对地高度大于23 m。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 张文亮,胡毅.发展特高压输电,促进全国联网[J].高电压技术,2003,29(8):20-22,31.
- [4] 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.
- [5] 陆国庆,何宏明,张军.交直流输电线路相邻架设或公用走廊的探讨[J].高电压技术,1997,23(4):68-70.
- [6] 吴桂芳,余军,郭贤珊,等. ± 800 kV直流和1000 kV交流线路同走廊时的最小接近距离[J].中国电力,2007,40(12):22-26.
- [7] 朱普轩,杨光,贺建国,等.超/特高压输电线路电磁环境限值标准探讨[J].电网技术,2010,34(5):201-206.
- [8] 封滢彦,俞集辉.超高压架空输电线的工频电场及其影响(一)[J].重庆大学学报,2004,27(4):11-14.
- [9] 陈仕姜.500 kV超高压输电线路工频电场分布及控制研究[D].福州:福州大学,2006.
- [10] 万保权,路遥,鄢雄,等.500 kV同塔回线路无线电干扰和工频电场[J].高电压技术,2003,33(3):113-116.

(下转第36页)

高,历史数据与物理模型相结合的预测方法与仅采用物理模型的预测方法相比,系统跟踪计划出力的平均相对误差减小了4%。分析可知,跟随系统控制周期预测的功率预测精度越高,系统能量分配精度则越高,各发电组件的功率设定值能更切合其自身的实际发电能力,从而使发电系统的控制具有更小的跟踪误差。

3 总结

针对风光互补发电系统的能量分配时变周期要求提出了一种将历史数据与物理模型相结合的功率短期预测方法,此方法满足风光互补发电系统对功率预测时空分辨率的要求,可实现逐点与整体预测,同时随着系统控制周期的不断变化,满足预测周期的时间尺度可变。将预测结果应用到能量管理中,结果表明,历史数据与物理模型相结合的方法比仅采用物理模型的方法减小了4%的系统跟踪误差。

所提出的方法仅需要少量历史数据,能为整个风光互补发电系统的能量分配策略提供较为准确的功率参考值,该方法建立的模型鲁棒性强、计算时间短、不需要定期训练、工程实用性强。

参考文献

[1] 李金鑫,张建成,周阳. 风光储联合发电系统能量管理策略研究[J]. 华东电力, 2011, 39(12): 2026 - 2029.

[2] G. Capizzi, F. Bonanno, C. Napoli. A Wavelet Based Prediction of Wind and Solar Energy for Long-term Simulation of Integrated Generation Systems[C]. SPEEDAM

(上接第5页)

[11] 盛剑霓,等. 电磁场数值分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984.

[12] 强生泽. 220 kV同塔双回输电线空间工频电场理论计算[J]. 高电压技术, 2004, 30(5): 45 - 46.

[13] 杨晓玲,刘浔,张大鹏,等. 750 kV同塔双回交流输电线路电磁环境研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(4): 191 - 193.

[14] 邬雄,万保权,路遥. 1000 kV级交流输电线路电磁环境的研究[J]. 高电压技术, 2006, 36(12): 55 - 58.

[15] 郭日彩,许子智,李喜来,等. 110 ~ 500 kV输电线路典型设计[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 57 - 64.

2010 - International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2010: 586 - 592.

[3] 刘波,郭家宝,袁志强,等. 风光储联合发电系统调度策略研究[J]. 华东电力, 2010, 38(12): 1897 - 1899.

[4] 张征,王晓蓉. 新能源接入综合系统研究与实现[J]. 供用电, 2011, 28(1): 15 - 18.

[5] 王宏,李兵. 分布式风光互补电源的能量管理策略[J]. 电力电子技术, 2010, 44(6): 58 - 60.

[6] 施佳锋,冯双磊,丁茂生,等. 宁夏电网风光一体功率预测系统[J]. 宁夏电力, 2011, (1): 1 - 4.

[7] 冯双磊,王伟胜,刘纯,等. 风电场功率预测物理方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(2): 1 - 6.

[8] 翟载腾. 任意条件下光伏阵列的输出性能预测[D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2008.

[9] Sancho Salcedo - Sanz, Emilio G. Ortiz - Garc'a. Short Term Wind Speed Prediction Based on Evolutionary Support Vector Regression Algorithms[J]. Expert Systems With Applications, 2010(1): 4052 - 4057.

[10] Gong Li, Jing Shi, Junyi Zhou. Bayesian Adaptive Combination of Short-term Wind Speed Forecasts From Neural Network Models[J]. Renewable Energy, 2011: 352 - 359.

[11] Matthias Lange. On the Uncertainty of Wind Power Predictions - Analysis of the Forecast Accuracy and Statistical Distribution of Errors[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2005: 177 - 184.

[12] Rahman Saifur, Chowdhury B. H. Effects of clusters on the electric power form [J] wind farm. IEEE Tran on Apparatus and System, 1984, 103(8): 2158 - 2164.

(收稿日期: 2013 - 03 - 01)

[16] 张彤. 特高压输电走廊拥挤地区线路通道设计研究[D]. 河北: 华北电力大学, 2011: 15 - 16.

[17] 李永伟,袁俊,赵全江,等. 中国首条1000 kV单回路交流架空输电线路的设计[J]. 电机工程学报, 2010, 30(1): 117 - 125.

[18] 胡白雪. 超高压及特高压输电线路的电磁环境研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2006: 19 - 20.

作者简介:

石超群(1989),男,硕士研究生,从事过电压与绝缘配合、电磁兼容与仿真的研究。

(收稿日期: 2013 - 06 - 21)