

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2021.07.014

大场域来流空间强风风场的数值模拟研究

张军强¹, 李楠², 高永亮¹, 冯文韬³, 赵明曦⁴, 李晋¹,
张婧侯⁵, 贺博²

(1. 国网陕西省电力公司经济技术研究院, 西安 710075; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 3. 西安现代控制技术研究所, 西安 710065; 4. 国网江苏电力有限公司检修分公司, 南京 211100; 5. 国网西安供电公司, 西安 710032)

摘要: 合理构建强风风场的数值模拟方法, 对于准确探究输电塔、风机塔等典型电力设施在强风作用下的风致响应规律及抗风稳定性至关重要, 也是输变电工程技术领域的热点问题。针对现有研究及相关规范中对强风风场特性考虑不足的问题, 提出一种大场域来流空间强风风场的数值模拟方法。首先, 介绍空间强风风场的数值模拟流程及平均风速的模拟方法; 其次, 重点考虑大场域来流强风脉动风速的非高斯概率统计特性和空间分布相关性, 引入峰度和偏度对脉动风速非高斯特性进行数学描述, 并基于线性滤波法 AR 模型和 Gurley 相关性变形构建强风脉动风速模拟的数学模型, 完成强风风场的数值模拟; 最后, 选取实际工程中的输电塔为计算案例, 进行空间强风风场的模拟与验证。结果表明: 文中建立的强风风场模拟方法在工况上更加贴合实际, 经参数修改可适用于不同工况, 为进一步开展输电塔、风机塔等空间结构的风振响应分析、失效概率计算乃至抗风设计研究提供可靠的研究基础。

关键词: 强风; 风速时程; 数值模拟; 非高斯特性

Study on Numerical Simulation of Strong Wind Field in Large Field and Inflow Space

ZHANG Junqiang¹, LI Nan², GAO Yongliang¹, FENG Wentao³,
ZHAO Mingxi⁴, LI Jin¹, ZHANG Jingyu⁵, HE Bo²

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Company Economic and Technological Research Institute, Xi'an 710075, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, China; 4. Maintenance Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 5. State Grid Xi'an Power Supply Company, Xi'an 710032, China)

Abstract: Reasonable construction of numerical simulation method of strong wind field is of great importance for exploring accurately the wind-induced response law and wind-resistant stability of such typical power facilities as transmission towers and wind turbine towers under action of strong wind. It is also a hot issue in the field of power transmission and distribution engineering. In view of the insufficient consideration of the characteristics of strong wind field in existing study and relevant specifications, a kind of numerical simulation method of strong wind field in large field and inflow space is proposed in this paper. Firstly, the numerical simulation process of strong wind field and the simulation method of average wind speed are introduced. Secondly, kurtosis and skewness are introduced to perform mathematical description of non-Gaussianity characteristic of fluctuating wind speed with consideration of non-Gaussianity probability statistical feature and spatial distribution correlation of strong wind fluctuating wind speed of large field and inflow space. The mathematical model of strong wind fluctuating wind speed is constructed based on linear filtering AR model and Gurley correlation transformation and the numerical simulation of the strong wind field is achieved. Finally, the transmission tower in actual project is selected as the calculation case to simulate and verify the space strong wind field. The results show that the simulation method of strong wind field in this paper is more suit-

收稿日期: 2021-02-24; 修回日期: 2021-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51977170)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(51977170).

able for actual working conditions, and can be applied to different working conditions through parameter modification. It can also provide reliable study base for the wind-induced response analysis, failure probability calculation and wind-resistant design of such space structures as transmission tower and wind turbine towers etc.

Key words: strong wind; wind speed time series; numerical simulation; non-Gaussianity characteristic

0 引言

在电力工程领域,对于输电塔、风机塔等典型高耸结构而言,其振动周期接近于风的卓越周期,因而对风载荷极为敏感^[1-2]。风载荷超越其他载荷,成为其在设计和运行中的决定性载荷^[3-4]。合理开展风振响应研究、提高结构抗风承载力一直是输变电工程技术领域的研究热点^[5-8],而研究的关键在于获取准确的风速时程。

就目前而言,获取风速时程的方法主要有风洞试验、现场实测和数值模拟^[9-11]。数值模拟由于其简单易行,重复性强且有助于获得规律性结论而得到广泛应用。现有风速模拟及抗风计算中,多将自然风看作是各态历经的平稳高斯随机过程^[12-14],分别采用线性滤波法、谐波合成法和小波分析法等系列方法模拟生成脉动风速后,与平均风速叠加后得到瞬时风速^[15-17],这对于空旷平坦地形下的平稳风而言是可行的。而事实上,输电塔、风机塔等电力设施在运行中难免经常遭遇强风等特殊气候环境,需要对强风风场进行深入探讨。

强风是指平均风速超过 10.8 m/s 的 6 级以上大风。大量实测表明^[18-19],大场域来流强风风场往往表现出以下特征:①空间相关特性:在大场域来流中,空间各点风速的相关性更为显著;②概率分布特性:强风脉动风速往往呈现出一定的非高斯特性,不再适用平稳高斯过程。此时,若继续将风载荷处理为平稳高斯随机过程进行载荷施加及响应计算会得到错误的结论。

为了凸显强风风场的基本特性,文中提供一种大场域来流空间强风风场的数值模拟方法。首先,介绍空间强风风场的数值模拟流程及平均风速模拟方法;其次,考虑强风脉动风速的功率谱密度函数、空间相关特性和概率分布特性,基于线性滤波法 AR 模型和 Gurley 相关性变形,重点讨论空间强风脉动风速的数值模拟方法,使得模拟脉动风速满足以下特征:①具有特定的脉动风速功率谱;②具有一定的空间相关性;③具有特定的概率分布形式;最后,以实际高压输电塔一线体系中的某输电塔为例,进行空间强风风场的模拟与验证。

1 空间强风风场的数值模拟方法

空间风场中任一点的瞬时风速由平均风速和脉动风速构成,即

$$v(x, y, z, t) = \bar{v}(x, y, z, t) + v_f(x, y, z, t) \quad (1)$$

因此,空间风场模拟可以转化为对空间各点平均风速和脉动风速的模拟,空间风场模拟示意图见图 1。

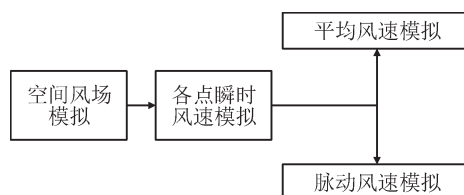


图1 空间风场模拟示意图

Fig. 1 Schematic diagram of space wind field simulation

对于平均风速,采用 Davenport 提出的指数率换算公式来计算为

$$\frac{\bar{V}}{\bar{V}_{10}} = \left(\frac{z}{10} \right)^K \quad (2)$$

式(2)中: $\bar{V}_{10}$ 为 10 m 高度处的平均风速, m/s; z 为当前高度, m; K 为地面粗糙度系数。

对于脉动风速,需要考虑强风载荷特性进行模拟及验证。

2 强风脉动风速的数值模拟方法

强风风场中,空间多点脉动风速具有一定的空间相关性,且呈现出一定的非高斯特性。因此,模拟强风脉动风速时需要考虑以下特征:①具有特定的风速功率谱;②具有一定的空间相关性;③具有特定的概率分布形式。

2.1 强风脉动风速的功率谱密度函数

风速功率谱密度函数用来表征脉动风速在某一频域内能量的大小。中国的《建筑结构荷载规范》采用 Davenport 自功率谱密度函数为:

$$S_v(n) = 4K\bar{V}_{10} \cdot \frac{x^2}{n(1+x^2)^{4/3}} \quad (3)$$

$$x = 600\omega/\pi\bar{V}_{10} \quad (4)$$

式(3)、(4)中: $S_v(n)$ 为功率谱密度函数; ω 为脉动风频率。

2.2 强风脉动风速的空间相关性

大场域来流空间各点的脉动风速在时间和空间上具有一定的相关性,引入相干函数来描述这种特性为

$$r_{ij} = \exp \left\{ - \sqrt{\frac{(x_i - x_j)^2}{50^2} + \frac{(y_i - y_j)^2}{50^2} + \frac{(z_i - z_j)^2}{60^2}} \right\} \quad (5)$$

式(5)中: x, y, z 为空间点的坐标; r_{ij} 为相干系数。

2.3 强风脉动风速的概率分布特性

大量实测表明:强风及特殊地形环境下的风速序列多具有非高斯特征,不能继续将其视为平稳高斯随机过程,需要引入峰度和偏度来描述脉动风速的非高斯概率分布形式。采用Gurley相关性变形对高斯过程进行非高斯变换^[20-35]。

其基本原理是将高斯过程转化为非高斯过程,Gurley相关性变形的计算方法为:

$$R_{\text{non}} = \alpha^2 [R_n + 2h_3 R_n^2 + 6h_4 R_n^3] \quad (6)$$

$$v_{\text{non}} = \alpha [v_n + h_3(v_n^2 - 1) + h_4(v_n^3 - 3v_n)] \quad (7)$$

式(6)、(7)中的参数计算方法为:

$$h_3 = \gamma_3 / (4 + 2\sqrt{1 + 1.5\gamma_4}) \quad (8)$$

$$h_4 = (\sqrt{1 + 1.5\gamma_4} - 1) / 18 \quad (9)$$

$$\alpha = (1 + 2h_3^2 + 6h_4^2)^{-1/2} \quad (10)$$

式(8)–(10)中: γ_3 为脉动风速序列的偏度; γ_4 为脉动风速序列的峰度; v_n 和 R_n 为高斯脉动风速序列及其自相关函数; v_{non} 和 R_{non} 为非高斯脉动风速序列及其自相关函数。

2.4 强风脉动风速的数值拟流程

结合上述特征,在给定脉动风速概率分布的峰度和偏度后,首先由线性滤波法AR模型生成空间高斯脉动风速序列,然后结合Gurley相关性变形进行相关变换,得到空间强风脉动风速的模拟方法。

利用线性滤波法AR模型模拟生成空间多点的高斯脉动风速序列,其具体步骤为

$$v_n(t) = - \sum_{k=1}^p \Psi_k v_n(t - k\Delta t) + L \cdot n(t) \quad (11)$$

式(11)中: Ψ_k 为AR模型自回归系数矩阵; P 为AR模型自回归阶数; $n(t)$ 为均值为0、方差为1的标准正态随机序列; L 为下三角矩阵,可通过对 R_n 进行Cholesky分解得到。

对式(11)两边同时乘以 $v_n^T(t - j\Delta t)$ 并取期望得:

$$R_n[j\Delta t] = - \sum_{k=1}^p \Psi_k R_n[(j - k)\Delta t] \quad (12)$$

$$R_n[0] = - \sum_{k=1}^p \Psi_k R_n[k\Delta t] + R_N \quad (13)$$

将式(12)、(13)式写成矩阵形式即为

$$R_n \cdot \Psi = \begin{pmatrix} R_N \\ O_p \end{pmatrix} \quad (14)$$

式(14)中: R_N 为平稳高斯脉动风速的自相关矩阵; O_p 为零矩阵。

根据维纳—辛钦定理有

$$R_{nij}(t) = \int S_{ij}(f) \cos(2\pi f \cdot m\Delta t) df \quad (15)$$

大场域来流风速分布在空间上具有一定的相关性,考虑脉动风速分布的空间相关性,由相干函数和自功率谱密度函数确定式(15)中的互功率谱密度函数为

$$S_{ij}(f) = r_{ij}(f) \cdot \sqrt{S_{ii}(f) S_{jj}(f)} \quad (16)$$

综上,可以得到空间多点高斯脉动风速序列,进一步采用Gurley相关性变形进行非高斯变换,得到空间多点非高斯脉动风速的模拟流程见图2。

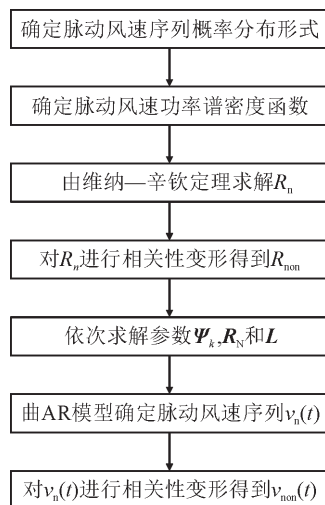


图2 空间多点非高斯脉动风速模拟流程

Fig. 2 Flow chart of spatial multi-point non-Gaussian fluctuating wind speed simulation

给定强风脉动风速的功率谱以及风速分布的峰度和偏度后,通过上述流程生成满足条件的空间多点脉动风速序列,结合图1模拟流程,最终建立空间强风风场的数值模拟方法。

3 算例分析及结果验证

3.1 算例模型及参数设置

为了验证模拟方法的正确性,文中以实际高压输电塔—线体系中的某输电塔为例,进行空间强风风场的模拟与验证。该输电塔的呼高27 m,总高36 m,根开6.7 m,属于典型的高耸结构,且位于强风多发区。

实际计算中,不可能对输电塔每点的风速单独进行模拟。因此,根据有限元方法对该输电塔进行结构离散,选取代表高度处的模拟点进行风场模拟与验证。输电塔—线体系及铁塔结构离散化示意图见图3。

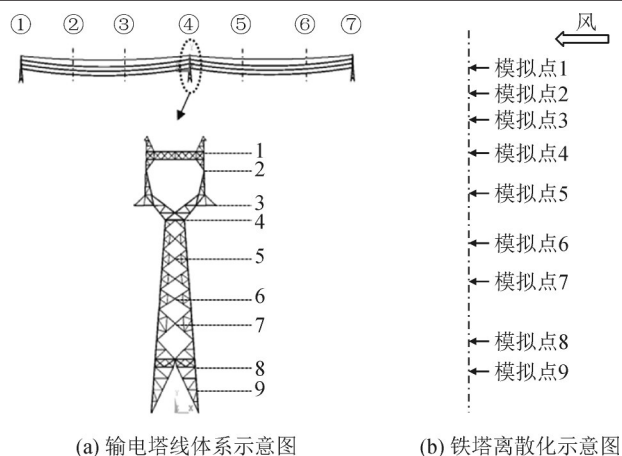


图3 输电塔线体系及铁塔离散化示意图

Fig. 3 Diagram of transmission tower-line system and discretization of the tower

离散后各个模拟节点的基本参数见表1。

表1 模拟节点的基本参数表

Table 1 Basic parameter table of the analog node

模拟点编号	高度/m	模拟点编号	高度/m
1	35.60	6	14.50
2	31.60	7	11.50
3	27.00	8	6.50
4	25.50	9	3.50
5	20.50	—	—

结合实测统计值,选定输电塔离散节点空间强风风场的模拟参数见表2。

表2 风场模拟的参数取值表

Table 2 Parameters for wind field simulation

参数项目	参数取值	参数项目	参数取值
目标峰度	4.26	基本风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	35
目标偏度	0.53	时间步长/s	0.1
功率谱	Davenport	模拟时长/min	3

3.2 风场模拟及结果验证

基于表2中的参数取值,利用文中提供的方法进行输电塔离散节点的空间风场模拟,将各点风速时程绘于图中,得到空间风场模拟云图见图4。

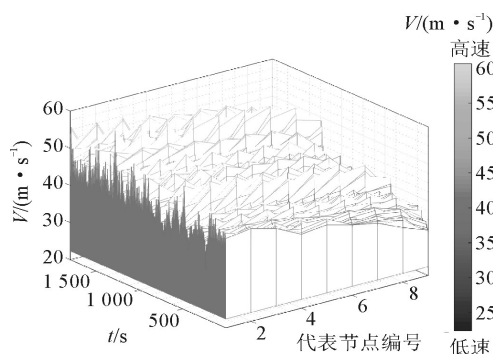


图4 各模拟节点风速生成结果

Fig. 4 Wind speed simulation of each simulation node

为进一步验证模拟结果的正确性,需要对各点风速时程的脉动风速功率谱、概率分布形式以及空间相关性进行验证。

以模拟点5为例,提取其脉动风速时程见图5。

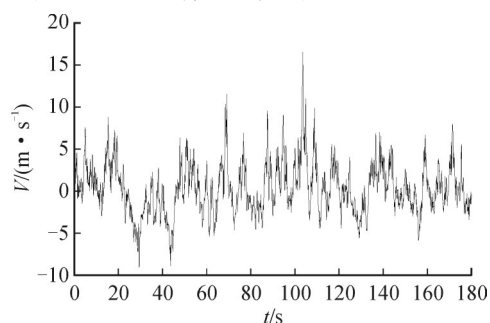


图5 模拟点5的脉动风速时程

Fig. 5 Fluctuating wind speed time series of simulation node 5

可以看出,该点脉动风速在0附近上下波动。进一步对其脉动风速功率谱进行检验验证,见图6。

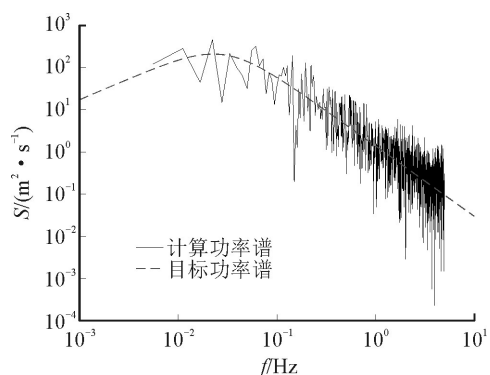


图6 模拟点5的计算功率谱与目标功率谱对比

Fig. 6 Comparison between computed power spectrum and target power spectrum of simulation node 5

由图6可以看出,该点脉动风速的计算功率谱与目标功率谱吻合情况较好,满足功率谱函数要求。对其进行概率分布形式的验证见图7。

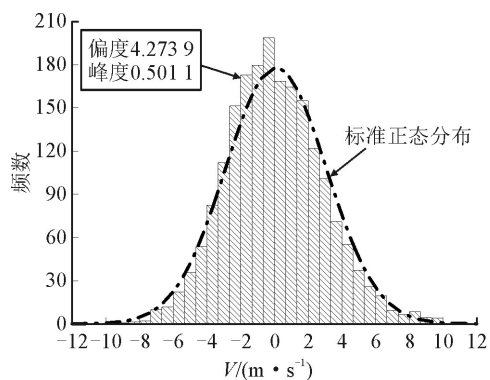


图7 模拟点5的概率分布形式验证

Fig. 7 Verification of probability distribution form of simulation node 5

从图7可以看出,模拟得到的脉动风速概率分布呈现出非高斯特性,峰度(4.26)、偏度(0.53)与目标

峰值(4.273 9)、目标偏度(0.501 1)之间的误差较小,满足要求。

最后,对各模拟点脉动风速的空间相关性进行验证见图8。

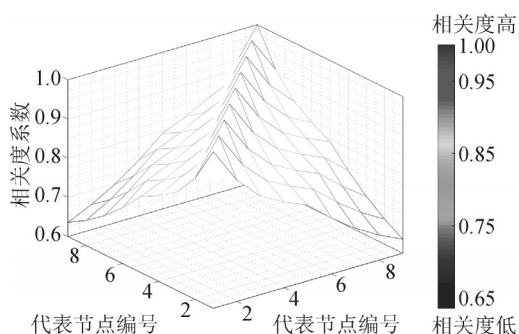


图8 各模拟点脉动风速的空间相关性

Fig. 8 Spatial correlation of fluctuating wind speed among each simulation point

由图8可以看出,各模拟点的脉动风速之间具有一定的相关性,且相关度随距离的增加而逐渐减弱。

4 结论

文中结合大场域来流空间强风风场的基本特性,具体论述了一种空间强风风场的数学模拟方法,并选取高压输电塔—线体系中的某输电塔为工程案例进行了风场模拟与验证,得到如下结论:

1)充分考虑了强风脉动风速的非高斯概率分布特性、空间相关特性以及风速功率谱,经参数修改,可适用于特定风场的数值模拟研究,具有一定普适性。

2)结合案例分析,印证了模拟方法的正确性,为下一步准确开展输电塔、风机塔等电力设施在强风下的风振响应研究提供了研究基础。

3)通过引入风速概率分布形式,为后期探索强风下的结构失效概率计算提供了新的思路。

参考文献:

- [1] HE Bo, ZHAO Mingxi, FENG Wentao, et al. A method for analyzing stability of tower-line system under strong winds [J]. Advances in Engineering Software, 2019(127): 1-7.
- [2] 阎石,牛健,于君元,等. 风力发电机塔架结构减振控制研究综述[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(1): 75-83. YAN Shi, NIU Jian, YU Junyuan, et al. Review of vibration control research of wind turbine tower structures[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(1): 75-83.
- [3] 贺博,修娅萍,赵恒,等. 强台风高压输电线路塔—线耦联体系的力学行为仿真分析一:静力响应分析[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 36-41. HE Bo, XIU Yaping, ZHAO Heng, et al. Simulation analysis of mechanical behavior of high voltage tower-line coupled system under strong typhoons Part I: Static response analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 36-41.
- [4] 贺博,修娅萍,赵恒,等. 强台风下高压输电线路塔—线耦联体系的力学行为仿真分析二:动力响应分析[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 42-47. HE Bo, XIU Yaping, ZHAO Heng, et al. Simulation analysis of mechanical behavior of high voltage tower-line coupled system under strong typhoons Part II: Dynamic response analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 42-47.
- [5] 柳国环,李宏男. 高压输电塔—线体系风致动力响应分析与优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2008(19): 131-137. LIU Guohuan, LI Hongnan. Analysis and optimization control of wind-induced dynamic response for high-voltage transmission tower - line system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008(19): 131-137.
- [6] 陈鑫,李爱群,王泳,等. 自立式高耸结构风振控制方法研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(7): 149-155. CHEN Xin, LI Aiqun, WANG Yong, et al. Investigation on techniques for wind-induced vibration control of self-standing high-rise structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(7): 149-155.
- [7] 赵玉顺,向奕同,董冰冰,等. 强风沙尘环境下车顶复合绝缘子风压分布和形变特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 7-14. ZHAO Yushun, XIANG Yitong, DONG Bingbing, et al. Wind pressure distribution and deformation characteristics of roof composite insulators under strong wind and dust environment[J]. High voltage apparatus, 2019, 55(12): 7-14.
- [8] 韩飞. 山区典型复杂地形桥址区强风特性研究[D]. 西安:西安科技大学, 2019. HAN Fei. Study on strong wind characteristics of bridge Sites with typical complex terrain in mountainous areas[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [9] 高亮,崔欣,白桦,等. 内陆强风特性三种研究途径的对比分析[J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(1): 41-45. GAO Liang, CUI Xin, BAI Ye, et al. Comparative analysis of the three ways used to study the characters of strong wind in inland China[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(1): 41-45.
- [10] 胡尚瑜,聂功恒,李秋胜,等. 近海岸强风风场特性现场实测研究[J]. 空气动力学学报, 2017, 35(2): 242-250. HU Shangyu, NIE Gongheng, LI Qiusheng, et al. Field measurement study on strong windstorm in coastal terrain[J]. ACTA Aerodynamica Sinica, 2017, 35(2): 242-250.
- [11] 张高良. 山区强风特性观测及风洞试验模拟研究[D]. 西安:长安大学, 2011. ZHANG Gaoliang. Field investigation and wind tunnel

- simulation of strong wind characteristics in mountainous regions[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [12] 肖正直. 特高压输电塔风振响应及等效风荷载研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- XIAO Zhengzhi. Wind - Induced response analysis and equivalent wind loads of UHV transmission tower[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [13] QIN L, YUAN J J, LI W. Random wind-induced response analysis of transmission tower - line system[J]. Energy Procedia, 2012, 16(1): 1813-1821.
- [14] 沈国辉, 黄俏俏, 郭勇, 等. 脉动风场的模拟方法及其在输电线路风振计算中的应用[J]. 空气动力学学报, 2013, 31(1): 69-74.
- SHEN Guohui, HUANG Qiaqiao, GUO Yong, et al. Simulation methods of fluctuation wind field and its application in wind-induced response of transmission lines[J]. ACTA Aerodynamica Sinica, 2013, 31(1): 69-74.
- [15] 杨文刚, 王璋奇, 朱伯文, 等. 特高压单柱拉线塔塔线体系风振响应时程分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3182-3191.
- YANG Wengang, WANG Zhangqi, ZHU Bowen, et al. Time history analysis on wind-induced response of UHV guyed single-mast transmission tower-line system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3182-3191.
- [16] 甘凤林, 杨振伟, 代晓光. 基于改进谐波合成法模拟输电塔线风速[J]. 电力建设, 2009, 30(10): 17-19.
- GAN Fenglin, YANG Zhenwei, DAI Xiaoguang. Analysis on wind-induced dynamic response of transmission tower-line system based on weighted amplitude wave superposition[J]. Power System Technology, 2009, 30(10): 17-19.
- [17] 孙芳锦, 顾明. 基于小波方法的空间风速场模拟[J]. 同济大学学报, 2011, 39(11): 1581-1585.
- SUN Fangjin, GU Ming. Spatial wind field simulation based on wavelet method[J]. Journal of Tongji University, 2011, 39(11): 1581-1585.
- [18] 罗叠峰. 沿海地区高层建筑抗风现场实测研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2015.
- LUO Diefeng. Field measurement research on wind resistance of high-rise buildings in coastal areas[D]. Hunan: Hunan University, 2015.
- [19] 申建红, 李春祥. 强风作用下超高层建筑风场特性的实测研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(5): 62-68.
- SHEN Jianhong, LI Chunxiang. Researches on measurements of wind field characteristics of high-rise buildings under strong wind[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(5): 62-68.
- [20] GURLEY K R, KAREEM A, TOGNARELLI M A. Simulation of a class of non-normal random processes[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 1996, 31(5): 601-617.
- [21] 陈刚, 何森, 周剑, 等. 多级协同的精细化负荷用户属性模型[J]. 广东电力, 2019, 32(2): 87-94.
- CHEN Gang, HE Sen, ZHOU Jian, et al. Multi-level coordinated detailed load user attribution model[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(2): 87-94.
- [22] 李哲, 刘澄, 周杨, 等. 用户侧分布式电源对配电网电流保护的影响[J]. 广东电力, 2019, 32(3): 81-87.
- LI Zhe, LIU Cheng, ZHOU Yang, et al. Influence of user-side distributed generation on distribution network current protection[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(3): 81-87.
- [23] 任庭昊, 代启臻, 郝新翔, 等. 低压微电网逆变器并联系统控制策略研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(6): 34-39.
- REN Tinghao, DAI Qican, HAO Xinxiang, et al. Control strategy of low voltage microgrid inverter parallel system[J]. Smart Power, 2019, 47(6): 34-39.
- [24] 陈永权, 王雄飞. 基于模糊层次分析法的我国电气化水平综合评价[J]. 智慧电力, 2019, 47(7): 24-28.
- CHEN Yongquan, WANG Xiongfei. Comprehensive evaluation of China's electrification level based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Smart Power, 2019, 47(7): 24-28.
- [25] 黄彪, 朱自伟, 钟少云, 等. 基于一致性算法的主动配电网源-荷-储分布式协调优化调度[J]. 智慧电力, 2019, 47(8): 91-98.
- HUANG Biao, ZHU Ziwei, ZHONG Shaoyun, et al. Distributed coordinated optimal dispatch of source-load-storage in adn based on consensus algorithm[J]. Smart Power, 2019, 47(8): 91-98.
- [26] 刘俊磊, 钱峰, 伍双喜, 等. 基于支持向量回归的直流受端电网动态无功需求在线评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 37-45.
- LIU Junlei, QIAN Feng, WU Shuangxi, et al. Online evaluation of dynamic reactive power demand of DC receiving power grid based on SVR[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 37-45.
- [27] 任自盼, 鲁宝春, 赵亚龙, 等. 光伏虚拟同步发电机建模与仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 92-99.
- REN Zipan, LU Baochun, ZHAO Yalong, et al. Research on modeling and simulation of photovoltaic virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 92-99.
- [28] 尹发根, 王淳. 基于无功补偿的电力弹簧有效运行范围分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 9-16.
- YIN Fagen, WANG Chun. Analysis of the effective operating range of electric spring based on reactive power compensation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 9-16.
- [29] 杨晶晶, 林凡勤, 周成瀚, 等. 含分布式电源的馈线电流序分量比较式保护[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 116-123.
- YANG Jingjing, LIN Fanqin, ZHOU Chenghan, et al. Com-

- parison protection method of current sequence components for feeder with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15):116-123.
- [30] 万航,周凯,曾琴,等.基于相位定位装置的中压电缆终端头运行电压定位方法研究[J].电测与仪表, 2019, 56(7): 30-34.
WAN Hang, ZHOU Kai, ZENG Qin, et al. Research on the location method of medium voltage cable terminal operating voltage based on phase location device[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(7): 30-34.
- [31] 韩永峰.经电子互感器接入静止式电能表的检定方法[J].电测与仪表, 2019, 56(8):41-44.
HAN Yongfeng. Verification method for static meters connected via electronic transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(8): 41-44.
- [32] 李俊卿,石天宇,郭晋才,等.永磁同步电机的电流鲁棒性优化方法研究[J].电测与仪表, 2019, 56(9): 15-20.
LI Junqing, SHI Tianyu, GUO Jincai, et al. Study on the current robust optimization method of permanent magnet synchronous motor[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(9):15-20.
- [33] 林崇,陈佳桥,王金友,等.新型混合储能功率变换器及控制策略研究[J].电器与能效管理技术, 2019(20):26-31.
- LIN Chong, CHEN Jiaqiao, WANG Jinyou, et al. Research on new hybrid energy storage power converter and its control strategy[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(20):26-31.
- [34] 李珏,刘灏,田建南,等.适用于主动配电网PMU的数据传输协议与通信性能分析[J].电力科学与技术学报, 2019, 34(2):3-10.
LI Jue, LIU Hao, TIAN Jiannan, et al. Communication protocol and performance analysis for the PMU of distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2):3-10.
- [35] 徐晨博,薛友,林紫茵,等.计及可转移负荷的电-气综合能源系统多目标优化[J].电力科学与技术学报, 2019, 34(3):13-23.
XU Chenbo, XUE You, LIN Zihan, et al. Multi-objective optimization of an integrated electricity-gas energy system considering transferable loads[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3):13-23.

张军强(1978—),男,高级工程师,长期从事高压输电线路设计及评审(E-mail:zjq8026@163.com)。

(上接第97页)

- [28] 周剑,罗添允,李智勇,等.基于改进可拓层次分析的停电影响综合评估[J].电力系统保护与控制, 2019, 47(3):31-38.
ZHOU Jian, LUO Tianyun, LI Zhiyong, et al. Comprehensive evaluation of power failure based on improved extension analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3):31-38.
- [29] 方涛,陈豪威,王媛媛,等.基于主频分量相关性的谐振接地配电网故障定位方法[J].电力科学与技术学报, 2018, 33(1):88-92.
FANG Tao, CHENG Haowei, WANG Yuanyuan, et al. A novel fault location method based on the waveform correlation of main frequency component for resonant grounding distribution system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1):88-92.
- [30] 刘远帆,肖先勇,任杰,等.不对称故障相位跳变和波形点对DFIG转子电压的影响[J].电力科学与技术学报, 2018, 33(2):73-82.
LIU Yuanfan, XIAO Xianyong, REN Jie, et al. Impacts of phase angle jump and point on wave during asymmetrical fault on rotor voltage of DFIG[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2):73-82.
- 张丹丹(1968—),女,博士,副教授,目前主要从事电气绝缘与放电、电气设备的状态监测与信息融合诊断、高电压新技术与应用的研究工作(E-mail:419230014@qq.com)。
- 苏小婷(1972—),女,硕士,工程师,目前主要从事电力电缆技术相关研究工作。