

# 含大规模风电的互联系统联络线随机功率波动幅值估计

吴俊利, 叶承晋, 龙厚印

(国网浙江省电力公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310002)

**摘要:**随着我国特高压电网的快速发展,大区电网实现互联是未来发展趋势。然而在特高压电网建设初期,互联系统的电气联系较弱,互联系统的联络线功率波动限制了其输送能力。文中提出了一种考虑负荷与风电随机波动特性的联络线波动幅值计算方法。首先深入研究了联络线输送功率的波动原理,给出了基于电力系统频率响应特性的联络线功率波动机制,并研究了风电与负荷波动的概率分布特性,在此基础上,提出了基于改进拉丁超立方抽样的联络线功率波动幅值估算方法。通过华北—华中互联系统算例分析验证了文中所提算法的准确性和有效性。

**关键词:**特高压电网;联络线;功率波动;改进拉丁超立方抽样

**中图分类号:** TM761

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2017)03-0012-05

## 0 引言

2009年初,长治—南阳—荆门特高压交流工程的投运,该线路作为联络线将华北与华中两大区域电网进行互联,形成规模最大的交流同步电网<sup>[1-6]</sup>。然而,在特高压电网建设初期,华北电网与华中电网电气联系不紧密,特高压交流联络线在正常运行时,存在有功功率随机波动的情况,其波动峰值可以达到功率缺额的70%~90%,很有可能接近或超过静态稳定极限,对电网安全稳定运行造成了极大的影响<sup>[7-14]</sup>。

分析联络线功率的录波曲线可知,功率波动可分为高频分量和低频分量<sup>[10]</sup>。高频分量是由系统受到扰动后的动态响应,其震荡周期与震荡幅值、扰动大小和区域震荡的阻尼比有关。而低频分量是随机功率波动在互联系统分配后在联络线波动的体现,具有较强的随机性,且周期较长。综上所述,因电网负荷及间歇性电源出力随机波动导致的联络线有功波动对互联系统安全稳定运行产生了较大的影响,其功率波动机制及幅值估计方法是目前亟待解决的问题。

国内相关学者对该问题进行了大量的研究工作,文献[12]针对直流闭锁及电源故障切机时联络线大幅度的功率波动,提出了互联系统联络线功率震荡的线性化模型。文献[13]基于互联系统的历史数据,研究了联络线功率偏差的概率分布特性。文献[14]使用蒙特卡洛随机模拟方法,提出了基于负荷波动特性的联络线概率分布估算方法,为了提高简单蒙特卡洛模拟效率,相关学者使用拉丁超立方抽样法和重要抽样法,并应用于电力系统可靠性

评估及概率潮流计算中<sup>[15,16]</sup>。

目前随着大规模风电接入电力系统,大区互联系统联络线的随机波动特性更加复杂。目前,国内相关文献仅对风电接入对电力系统稳定性的影响进行大量研究<sup>[17,18]</sup>,但风电接入对大区互联系统的联络线功率随机波动特性的影响研究较少。

针对该问题,本文对联络线低频随机功率波动的机理进行了研究,在考虑了负荷及风电波动特性的基础上,提出了基于改进拉丁超立方抽样的联络线有功波动幅值的概率分布估算方法。

## 1 联络线功率波动机制

### 1.1 负荷的波动特性

电力系统运行中常伴随着负荷的随机波动,正常情况下,负荷可分解成3种不同变化规律的分量:

$$P_L = P_{L_s} + P_{L_m} + P_{L_h} \quad (1)$$

式(1)中:负荷分量 $P_{L_s}$ 为高频分量,其特点是波动幅度较小,且波动周期通常在10 s以内;负荷分量 $P_{L_m}$ 为脉动分量,其特点是波动幅度较大,波动周期一般为10 s~3 min;负荷分量 $P_{L_h}$ 为持续分量,其特点是变化缓慢。

通过分析PMU曲线,发现联络线功率波动周期与负荷脉动分量的波动周期基本一致,因此本文主要研究脉动分量 $P_{L_m}$ 对联络线功率波动的影响。负荷的脉动分量波动量一般服从正态分布<sup>[11]</sup>:

$$f(\Delta P_{L_m}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta P_{L_m}}} e^{-\frac{(\Delta P_{L_m} - \overline{\Delta P_{L_m}})^2}{2\sigma_{\Delta P_{L_m}}^2}} \quad (2)$$

式(2)中: $f(\Delta P_{L_m})$ 为负荷脉动分量波动量 $\Delta P_{L_m}$ 的概率密度函数; $\overline{\Delta P_{L_m}}$ 为脉动分量波动量的期望值; $\sigma_{\Delta P_{L_m}}$ 为脉动分量波动量的标准差。

收稿日期:2017-01-10;修回日期:2017-03-08

## 1.2 风电功率的波动特性

风电作为一种技术成熟的清洁可再生能源,目前已在我国得到了快速发展,2015年风电并网装机已经超过100GW。风电出力具有较强的波动性以及反调峰特性,大规模风电并网会带来电力系统安全稳定问题以及调峰调频问题。目前风电外送可通过互联系统的联络线,然而风电功率的波动会导致联络线有功功率的波动。文献[19-21]对风电功率波动量的概率分布进行了研究,发现波动周期为10s~3min的风电功率波动量服从拉普拉斯分布:

$$f(\Delta P_w) = \frac{1}{2\sigma_{\Delta P_w}} e^{-\frac{|\Delta P_w - \overline{\Delta P_w}|}{\sigma_{\Delta P_w}}} \quad (3)$$

式(3)中: $f(\Delta P_w)$ 为风电功率波动量的概率分布函数; $\Delta P_w$ 为风电功率波动量; $\overline{\Delta P_w}$ 为风电功率波动量的期望值。 $\sigma_{\Delta P_w}$ 为风力功率波动量的标准差。

## 1.3 电力系统的静态频率特性

电力系统中负荷与风电的随机波动,会引起系统输出有功与负荷需求的不平衡,进而引起系统的频率变化。若频率发生变化,常规发电机组将通过自动控制装置调节汽轮机的进汽量或水轮机的进水量,以调节从而调整机组出力,以达到新的有功平衡。常规机组的静态频率特性为:

$$K_G = -\Delta P_G / \Delta f \quad (4)$$

式(4)中: $K_G$ 为常规机组的静态频率特性系数; $\Delta P_G$ 为常规机组的有功变化值; $\Delta f$ 为系统频率变化量。

电网稳态运行中,负荷的静态频率特性为电力负荷对于系统频率的变化特性,在频率偏离额定频率较小时,静态频率特性采用线性关系表示:

$$K_L = \Delta P_L / \Delta f \quad (5)$$

式(5)中: $K_L$ 为负荷的静特性系数; $\Delta P_L$ 为负荷变化量。

电力系统的频率静态特性由负荷与常规机组的静态特性决定,即:

$$K_S = K_G + K_L \quad (6)$$

式(6)中: $K_S$ 为系统的静特性系数,表示在考虑常规机组及负荷的一次调频情况下,负荷及风电波动造成的系统频率偏移量。

## 1.4 互联系统联络线的功率波动

如图1所示。在互联电力系统中,随机功率的波动不仅引起系统频率的变化,同时也会使联络线交换功率发生波动。 $\Delta P_{LA}$ 和 $\Delta P_{LB}$ 分别为2个系统的负荷波动量, $\Delta P_{WA}$ 和 $\Delta P_{WB}$ 分别为2个系统的风电功率波动量, $\Delta P_{GA}$ 和 $\Delta P_{GB}$ 分别为2个系统常规机组的有功功率调节量。 $K_{SA}$ 和 $K_{SB}$ 分别为2个系统的

静态频率特性系数。若2个系统都参与调频,则对于2个系统,需满足以下有功平衡:

$$\Delta P_{GA} + \Delta P_{WA} - \Delta P_{AB} - \Delta P_{LA} = \Delta f \times K_{SA} \quad (7)$$

$$\Delta P_{GB} + \Delta P_{WB} - \Delta P_{AB} - \Delta P_{LB} = \Delta f \times K_{SB} \quad (8)$$

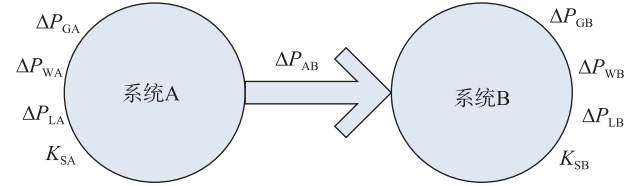


图1 区域互联系统

Fig.1 Regional interconnection system

联解式(7)和式(8),可得互联系统的频率变化值为 $\Delta f$ ,联络线有功功率波动量 $\Delta P_{AB}$ ,即:

$$\Delta f = [(\Delta P_{GA} + \Delta P_{WA} - \Delta P_{LA}) + (\Delta P_{GB} + \Delta P_{WB} - \Delta P_{LB})] \times (K_{SA} + K_{SB})^{-1} \quad (9)$$

$$\Delta P_{AB} = [K_{SB}(\Delta P_{GA} + \Delta P_{WA} - \Delta P_{LA}) - K_{SA}(\Delta P_{GB} + \Delta P_{WB} - \Delta P_{LB})] \times (K_{SA} + K_{SB})^{-1} \quad (10)$$

## 2 基于改进拉丁超立方抽样的联络线功率波动幅值估算

### 2.1 改进拉丁超立方抽样原理

通过分析,简单蒙特卡罗模拟方法计算效率较低,不能满足在线应用要求,本文提出改进拉丁超立方抽样方法(LBS)估算联络线随机功率波动幅值。LBS方法可以显著降低抽样次数,考虑进一步降低抽样误差,本文考虑使用重要抽样方法对LBS进行改进,并提出了改进LBS方法。

首先,采用重要抽样方法对原概率分布 $P(X)$ 进行重构形成最优分布 $P_{op}(X)$ ,从而在保证期望值不变的情况下降低抽样误差,最优分布需满足:

$$P(X) = \frac{F(X)}{E(F)} P(X) = P_{op}(X) \quad (11)$$

式(11)中: $F(X)$ 为累积概率分布; $E(F)$ 为 $F(X)$ 的期望值。

其次,将区间 $[0,1]$ 等分为 $N$ 个不重叠的子空间,并在每个子空间中进行随机抽样选择 $R_k$ ,并根据 $F(X)$ 的反函数计算采样点 $\xi_{R_k}$ 。

最后,若每一个子空间均已被抽样,则重新从各子空间抽样,直至达到收敛条件。

改进LBS在各个子空间进行等概率抽样,可以保证抽样点尽可能分布均匀,从而提高计算效率和计算精度。

## 2.2 基于改进 LBS 的联络线功率波动幅值估算流程

在考虑了风电功率及负荷的随机波动的基础上,给出联络线功率波动幅值的估算流程,如图 2 所示。

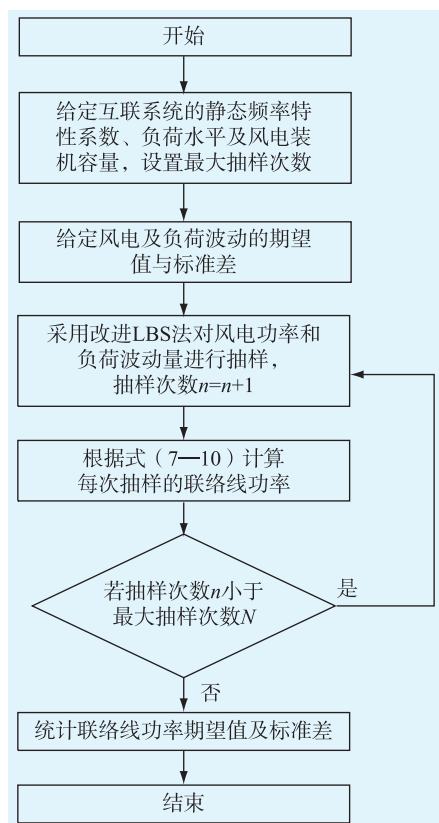


图 2 基于改进 LBS 的联络线功率波动幅值估算流程图

Fig.2 Algorithm flowchart for estimation of tie-line stochastic power fluctuation based on improved LBS

(1) 给定互联系统的静态频率特性系数  $K_{SA}$  和  $K_{SB}$ 、负荷及风电装机,设置最大抽样次数  $N$ 。

(2) 给定风电及负荷的随机波动的期望与方差。

(3) 采用改进 LBS 方法对风电功率及负荷波动量进行随机抽样,抽样次数  $n = n + 1$ 。

(4) 根据式(7—10)计算每次抽样的联络线功率。

(5) 若抽样次数小于最大抽样次数  $N$ ,则重复步骤(3)和(4),否则进入步骤(6)。

(6) 统计联络线功率的期望方差及绘制概率分布图,并结束算法流程。

## 3 算例分析

算例选取华北—华中 2 个区域互联系统,并采用所提改进拉丁超立方抽样方法求解该系统联络线的随机功率波动幅值的概率分布进行计算,并选

取简单蒙特卡洛模拟算法进行 20 000 次抽样模拟结果作为基准值。

根据文献[12]和文献[14]的研究数据表明,华北与华中系统的静态频率特性系数标么值分别为 5.9 和 4.9,2 个系统的容量分别为 112 GW 和 140 GW。根据 1.1 节和 1.2 节所述,系统负荷的随机波动值满足正态分布  $N(\mu, \sigma^2)$ ,根据文献[14]的研究数据表明,参数取  $\mu = 0, \sigma = 0.1$ ,风电功率的随机波动量服从拉普拉斯分布  $L(\mu, b)$ ,根据文献[17],参数取  $\mu = 0, b = 1\%$ 。

通过上述给出联络线功率随机波动幅值的改进 LBS 计算流程,求解得到不同风电功率水平下的联络线功率幅值的期望与方差,如表 1 所示。风电功率为 5 GW 下的联络线随机功率波动的概率分布图如图 3 所示。

表 1 不同风电装机水平下的联络线随机功率波动幅值

风电功率	普通蒙特卡洛模拟法		LBS 法		改进 LBS 法	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
0	290.12	89.12	290.49	88.18	290.14	89.94
1000	290.19	93.47	290.01	92.41	290.23	93.91
5000	290.26	127.44	290.67	128.97	290.41	126.95
10 000	290.38	162.12	290.71	165.25	290.24	161.09
15 000	290.08	198.46	290.54	196.31	290.19	199.45

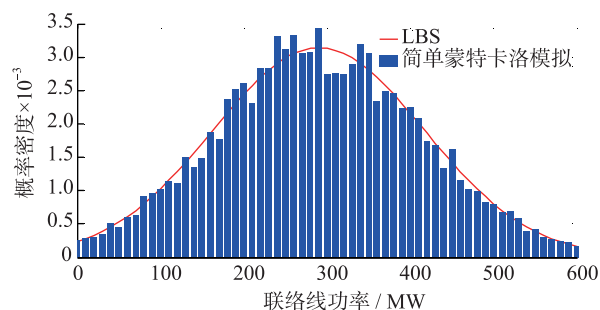


图 3 联络线功率波动概率分布图(风电装机容量=5 GW)

Fig.3 Probability distribution of tie-line stochastic power fluctuation (wind power installed capacity=5 GW)

由表 1 可知,本文所提算法求解得到的联络线功率波动幅值的均值与标准差与简单蒙特卡洛模拟算法结果基本一致,期望值和标准差的最大误差分别为 0.15 MW (0.05%) 和 1.03 MW (0.91%),而普通 LBS 法的期望值和标准差的最大误差为 0.46 MW (0.16%) 和 3.13 MW (1.94%),可以看出改进 LBS 法计算精度明显优于 LBS 法。

不同风电装机水平下 3 种算法的计算效率及误差如表 2 所示。

表2 不同风电装机水平下3种算法的计算效率及误差

Table 2 Computational efficiency and error of three algorithms under different wind power installed capacity

风电功率/MW	普通蒙特卡洛模拟法 计算时间/s	LBS法			改进LBS法		
		均值误差/%	标准差误差/%	计算时间/s	均值误差/%	标准差误差/%	计算时间/s
0	183.6	0.13	1.05	7.6	0.01	0.92	7.9
1000	185.4	0.06	1.13	7.6	0.01	0.47	7.9
5000	185.9	0.14	1.20	7.6	0.05	0.38	7.9
10 000	185.7	0.11	1.93	7.6	0.05	0.64	7.9
15 000	185.5	0.16	1.08	7.6	0.04	0.50	7.9

对比3种算法的计算效率,不同风电功率水平下,普通蒙特卡洛模拟法、LBS法和改进LBS法的最大计算时间分别为185.9 s,7.6 s和7.9 s,LBS法和改进LBS法计算效率明显优于普通蒙特卡洛模拟法,从而验证了本文所提算法的准确性与有效性,同时说明了改进LBS法对于不同风电渗透率的系统均具有较好的适应性。

同时发现联络线功率均值基本保持不变,在290 MW左右;而随着风电容量的增加,风电功率波动值的方差逐渐增加,可发现风电随机波动对联络线功率波动的影响较大,降低电力系统稳定性。

## 4 结语

本文提出了基于改进拉丁超立方抽样的含大规模风电的互联系统联络线随机功率波动幅值估计方法,通过算例分析,可以发现本文所提的改进LBS算法的计算精度优于普通LBS法,且计算时间明显低于普通蒙特卡洛模拟法,验证了改进LBS算法的准确性和有效性。同时计算结果也表明对于典型的长链型弱联络系统,负荷及风电的随机功率波动将造成幅度较大的联络线功率波动,对于华北华中互联系统,随着风电容量的增加,风电功率的随机波动对联络线功率波动的影响逐渐增加,影响互联系统的稳定性,必须引起重视。

### 参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京:中国经济出版社,2013.  
LIU Zhenya. Ultra-high voltage AC&DC grid[M]. Beijing: China Electric Power Press,2013.
- [2] 张文亮,周孝信,印永华,等. 华北—华中—华东特高压同步电网构建和安全性分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(16):1-5.  
ZHANG Wenliang,ZHOU Xiaoxin,YIN YongHua,et al. Composition and security analysis of "North China-Central China-East China" UHV synchronous power grid[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(16):1-5.
- [3] 张运洲,李晖. 中国特高压电网的发展战略论述[J]. 中国

电机工程学报,2009,29(22):1-7.

ZHANG Yunzhou, LI Hui. Analysis on the development strategies of UHV grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2009,29(22):1-7.

- [4] 舒印彪,张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(31):1-6.  
SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang. Research of key technologies for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007,27(31):1-6.
- [5] 于鹏,刘巨,孙海顺,等. 联络线随机功率波动对其输电能力影响的分析方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(2):33-38.  
YU Peng,LIU Ju,SUN Haishun,et al. An analytic method for Impact of Stochastic Tie-line Power Fluctuation on Power Transmission Capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014,38(2):33-38.
- [6] 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.
- [7] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J]. 电网技术,2003,27(9):2-6.  
HU Xuehao. Rethinking and enlightenment of large scope blackout in interconnected North America Power Grid[J]. Power System Technology,2003,27(9):2-6.
- [8] 唐葆生. 伦敦南部地区大停电及其教训[J]. 电网技术,2003,27(11):1-6.  
TANG Baosheng. Blackout in south of London and its lessons[J]. Power System Technology,2003,27(11):1-6.
- [9] 韩祯祥,曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术,2004,28(9):1-6.  
HAN Zhenxiang, CAO Yijia. Power system security and its prevention[J]. Power System Technology,2004,28(9):1-6.
- [10] 张剑云,李明节,周济,等. 三峡巨型电站异常功率波动仿真与试验研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):122-129.  
ZHANG Jianyun,LI Mingjie,ZHOU Ji. Simulation and experiment research on the abnormal power fluctuation of the three gorges hydropower station[J]. Proceedings of the CSEE, 2012,32(16):122-129.
- [11] 王秀丽,曹成军,王锡凡. 互联系统可靠性效益评估方法[J]. 电网技术,2000,24(7):1-5.  
WANG Xiuli, CAO Chengjun, WANG Xifan. Reliability benefits evaluation method for power system interconnection[J]. Power System Technology,2000,24(7):1-5.
- [12] 汤涌,孙华东,易俊,等. 两区域互联系统交流联络线功率波动机制与峰值计算[J]. 中国电机工程学报,2010,30(19):1-6.  
TANG Yong, SUN Huadong, YI Jun, et al. AC tie-line power fluctuation mechanism and peak value calculation for two-area interconnected power systems[J]. Proceedings of the CSEE,

- 2010,30(19):1-6.
- [13] 陈磊,胡伟,徐飞,等. 互联系统联络线随机功率波动统计特性与评价标准分析[J]. 电网技术,2013,37(11):3137-3143.
- CHEN Lei,HU Wei,XU Fei,et al. Analysis on statistic characteristic and evaluation criteria of tie-line stochastic power fluctuation in interconnected power systems[J]. Power System Technology,2013,37(11):3137-3143.
- [14] 代仕勇,彭晓涛,朱利鹏,等. 基于负荷波动特性的联络线随机功率波动幅值估计[J]. 电力系统自动化,2013,37(21):29-33,51.
- DAI Shiyong,PENG Xiaotao,ZHU Lipeng,et al. Amplitude estimation for tie-line stochastic power fluctuation based on load fluctuation characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(21):29-33,51.
- [15] 张巍峰,车延博,刘阳升. 电力系统可靠性评估中的改进拉丁超立方抽样方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(4):52-57.
- ZHANG Weifeng,CHE Yanbo,LIU Yangsheng. Improved latin hypercube sampling method for reliability evaluation of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(4):52-57.
- [16] 李俊芳,张步涵. 基于进化算法改进拉丁超立方抽样的概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2011,31(25):90-96.
- LI Junfang,ZHANG Buhuan. Probabilistic load flow based on improved latin hypercube sampling with evolutionary algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(25):90-96.
- [17] 于强,孙华东,汤涌,等. 双馈风电机组接入对电力系统功角稳定性的影响[J]. 电网技术,2013,37(12):3399-3405.
- YU Qiang,SUN Huadong,TANG Yong,et al. Impact on angle stability of power system with doubly fed induction generators connected to grid[J]. Power System Technology,2013,37(12):3399-3405.
- [18] 和萍,文福拴,薛禹胜,等. 不同类型风电机组对小干扰和暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化,2013,37(17):23-29.
- HE Ping,WEN Fushuan,XUE Yusheng,et al. Impacts of different wind power generators on power system small signal and transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(17):23-29.
- [19] BLUDSZUWEIT H,DOMINGUEZ-NAVARRO J A,LLOMBAR A.Statistical analysis of wind power forecast error[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2008,23(3):983-991.
- [20] 张文婷,范立新,顾文. 考虑风电预测误差的电力系统有功实时调度[J]. 江苏电机工程,2016,35(1):11-15.
- ZHANG Wenting,FAN Lixin,GU Wen. Real-time active power dispatch of wind integrated system considering wind power forecast errors[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2016,35(1):11-15.
- [21] 卫鹏,刘建坤,周前. 考虑相关性的沿海大规模风电场出力特性研究[J]. 江苏电机工程,2016,35(5):6-9.
- WEI Peng,LIU Jiankun,ZHOU Qian. Research on power output characteristics of coastal large-scale wind farms considering their correlation[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2016,35(5):6-9.

作者简介:



吴俊利

吴俊利(1989—),男,浙江江山人,博士,研究方向为电网规划及安全分析;

叶承晋(1987—),男,浙江杭州人,博士,研究方向为电网规划及安全分析;

龙厚印(1985—),男,山东滕州人,工程师,研究方向为电网规划。

## Amplitude Estimation of Tie-line Stochastic Power Fluctuation for Interconnection Power System with Large-scale Penetrated Wind Power

WU Junli, YE Chengjin, LONG Houyin

(State Grid Zhejiang Economic Research Institute, Hangzhou 310002, China)

**Abstract:** With the rapid development of China's UHV power grid, the future development trend is the interconnection of the regional power grid. However, in the early stage of UHV power grid construction, the electrical connection of the interconnected system is weak, and the tie-line stochastic power fluctuation limits its transmission capacity. In this paper, a calculation method of the fluctuation amplitude of the tie-line considering the stochastic fluctuation characteristics of load and wind power is proposed, the power fluctuation mechanism of the tie-line based on the frequency response characteristic is introduced, the probability distribution of wind power and load fluctuation is studied, and the method of estimating power amplitude for tie-line based on improved Latin hypercube sampling is proposed. The accuracy and validity of the proposed algorithm are verified by the example of North China-Central China interconnection system.

**Key words:** ultra-high voltage grid; tie-line; power fluctuation; improved Latin hypercube sampling

(编辑 徐林菊)