

考虑网络损耗的直流近区风电场集电参数等值建模研究

针对直流近区风电场受直流输电特性的交互影响,极易出现并网点暂态过电压问题,在确定风电场运行状态,评估风电机组暂态过电压能力的过程中,集电等值参数对风电场等值模型的影响不容忽视。针对直流近区风电场的集电参数等值建模问题,结合暂态过电压功率特性,提出一种考虑损耗的风电场集电网络等值建模方法,定量化研究了风电场内机组过电压水平受集电参数的影响。以实际电网为例,仿真风电场汇集的直流外送系统两次换相失败,分析其暂态过电压特性及风电场等值模型输出特性,得出结论:考虑集电参数损耗的等值模型与实际风电场的功率损耗、平均电压特性基本保持一致;并网点过电压时,风电场内各机组机端电压水平受集电参数的影响,远端机组电压变化幅度小于近端机组,相差为额定电压的2.5%左右。

王秋实 翟铁军 张德超 袁 野 肖立东/国网铁岭供电公司

0 引言

我国大型风电场主要分布在风能资源丰富的“三北”地区,加强大规模风电场跨区域输电能力可有效解决风电本地消纳能力低以及弃风严重问题。研究表明直流输电是实现大规模风电基地直流外送的有效手段^[1-2]。考虑到直流近区风电场与直流输电特性的交互影响,易发生换相失败、直流闭锁等扰动,输送有功功率与无功功率大幅度波动,引起换流站侧及近区风电场并网点暂态过电压问题^[3-4]。

与常规机组不同,风力发电机转动惯量小,系统频率调节能力低,耐电压能力不足,当系统频率和电压大幅波动时,由于系统调节能力不足极易导致风电脱网,进而引起系统安全稳定问题。

换流站侧暂态过电压时,无功反送造成近区风电场并网点过电压,考虑到集电参数的功率损耗,电场内部风电机组过电压水平存在一定差异。在系统安全稳定分析中,随着风电装机容量不断增大,建立相应的风电场等值模型,由等值风电机组机端电压特性评估整个风电场机组的过电压水平尤其重要。目前由于实际风电机组的高电压耐受能力较差,会扩大暂态过电压影响范围,恶化高电压问题,易引起高压连锁故障^[5-7]。分析风电机组耐压能力,合理规划风电场接入方式,优化机组保护控制参数,对风电场等值模型的研究提出更高要求。

目前,风电场等值建模研究已有较多报道。文献[9]考虑风电机组LVRT的无功特性,以二机并联模型为基础,建立适用于低电压穿越的恒定阻抗等值变换,保持稳态时有功损耗一致,故障时无功功率一致。文献[10]对直流近区暂态过电压引起风电机组联锁脱网风险及应对策略作初步研究,结合风电机组耐高压能力较低,以及风电机组高电压联锁脱网特性相,阐述了直流近区暂态过电压引起风电脱网的机理。文献[11]建立包括风电场内部集电线路的直驱风电场等值模型,分析了集电参数对风电场聚合模型准确度的影响,进行暂态仿真时,不能忽略线路损耗造成的误差。

为确定直流近区风电场并网点出现暂态过电压时风电场运行状态,评估风电机组耐压能力,以损耗一致为原则,本文提出一种考虑损耗的风电场集电网



王秋实/助理工程师

关键词/Keywords

直流近区·
暂态过电压·
损耗·
集电参数·

络等值方法, 定量化研究了风电场内机组过电压水平受集电参数的影响。最后以实际电网为例, 仿真分析直流换相失败期间暂态过电压过程, 比较考虑集电网络等值与无集电等值阻抗的风电场模型特性差异。比较风电场近端和远端机组暂态过电压特性, 可得风电场内各机组机端电压水平受集电参数的影响, 远端机组电压增幅低于近端机组。两种等值模型输出功率及电压特性对比表明考虑集电参数损耗的等值模型与实际风电场的功率损耗、平均电压特性基本保持一致。

1 直流近区暂态过电压问题

LCC-HVDC输电技术依靠电网电源进行换相, 换流器从系统吸收大量无功功率维持其正常运行, 安装交流滤波器组实现对换流器无功补偿。换相失败产生的原因主要是交流电网扰动, 当系统故障引起逆变侧电压降低, 造成阀门关断导通失败, 称之为换相失败^[8]。对于换相失败恢复期间的送端系统过电压问题, 主要特征为逆变侧电压恢复时, 导致直流电流降低, 整流侧消耗无功功率大幅度减少, 交流滤波器大量无功功率反送, 造成电压升高。研究表明投入交流滤波器越多, 近区风机出力越高, 换流站暂态压升越高, 并随电气距离逐渐降低。2013年11月6日, 某直流输电网中交流故障引起直流换相失败, 送端换流站暂态过电压高达1.35 (pu)^[10]。

发生直流闭锁后, 有功功率急剧降低至零, 交流滤波器切除有一定滞后时间, 与换相失败恢复阶段相似, 大量无功功率倒送至直流送端系统, 同样会引起系统电压升高。

直流近区风电场运行状况受暂态过电压影响较大, 考虑到风电机组耐压能力差, 存在直流扰动后风电场脱网的风险^[9-10], 风电机组耐压能力的准确评估, 对合理规划风电场接入方式, 优化机组保护控制参数具有重要作用。

2 暂态过电压下的风电场输出特性

目前对大规模风电并网的仿真研究倾向于将风电场看作整体, 采用聚合模型模拟风电场并网点的

对外特性, 从而降低模型阶数及仿真时间^[11-13]。

以单机等值风电机组接入并网点模型为例, 如图1所示, 为无功功率反送时风电场运行特性。输出功率为 $P-jQ$ 的风电机组依次经变压器和恒定集电线路连接至并网点CPP, 其中 R_W+jX_W 表示模型中集电线路和变压器的阻抗和。图1中并网点电压 U_{CPP} , 机端电压 U , 输出功率 P_p-jQ_p , 无功功率反送。

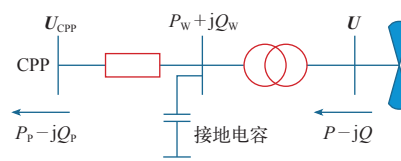


图1 单机模型

当并网点电压 U_{CPP} 超过额定标称值出现暂态过电压问题时, CPP点输出有功功率发生大幅度波动, 无功功率反送, 以CPP点为参考点, 功率流动以图1箭头方向为正方向, 则机组机端电压 U 表示为

$$U = U_{CPP} + \frac{(R_W + jX_W)}{U_{CPP}} (P_p + jQ_p) \quad (1)$$

其电压增量表示为

$$\begin{aligned} \Delta U &= \Delta U_{CPP} + (R_W + jX_W) \Delta I \\ &= \Delta U_{CPP} + (R_W + jX_W) \left(\frac{\Delta P_p + j\Delta Q_p}{U_{CPP}} - \Delta U_{CPP} \frac{P_p + jQ_p}{U_{CPP}^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可知机组机端电压与并网点电压的变化量有一定差异, 由于电缆线路接地电容吸收部分无功功率, 考虑到变压器电压损耗和功率损耗的影响, 造成机端电压 U 受风电场集电网络参数和线路功率的影响较大, 而风电机组输出无功功率主要由机端电压决定, 暂态过电压过程中, 并网点特性显示风电机组吸收无功功率。

直流近区风电场在并网点过电压情况下, 风电场运行状态由机组机端电压特性决定, 等值模型机端电压波动情况与并网点电压特性不同, 受集电线路阻抗、线路接地电容和升压变压器的影响。由此可知, 建立包含集电网络等值的风电场等值模型, 有利于准确评估机组耐压能力, 确定

风电场实际运行状态。

3 考虑损耗的集电网络等值算法

针对当前大型风电场拓扑结构复杂多变，规模越来越大，风电机组间距远，集电网络损耗对风电场的影响日益突出，而风电场的工程建模，常常忽略电缆线路，针对风电场集电参数等值的相关研究取得一定进展^[14-15]。但是在系统安全稳定分析计算过程中，依据并网点或机端电压暂态过电压特性确定风电场运行状态时，风电场等值模型的建立存在一定缺陷。

本文采用的风电场内部线路参数等值计算遵循损耗一致的原则，将 n 台风机单机聚合，由于风电场多采用电缆线路相接，接地电容不容忽视，其等值接地电容为

$$Y_{n\Delta} = \sum_{i=1}^n Y_{\Delta i} \quad (3)$$

式中， $Y_{\Delta i}$ 为连接单台机组的电缆线路接地电容； $Y_{n\Delta}$ 为 n 台风机组的风电场电缆线路接地电容等值。

大型风电场机组之间连接方式分为干线式、放射式及混合式，本文针对两种典型接线方式的集电线路等值分别计算。

3.1 干线式接线网络等值

设风机之间电缆阻抗为定值 Z_i ，以4台风电机以干线式接线为例，计算单机等值模型中集电线路参数，如图2所示。

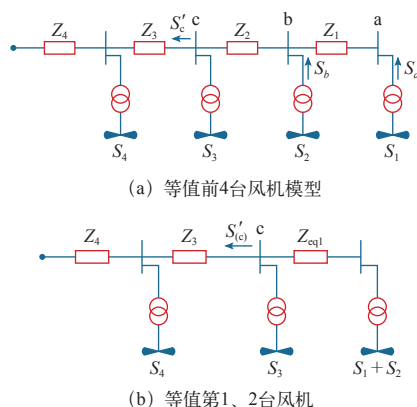


图2 干线式接线机组等值模型

如图2a所示，首先将风电机组1与2等值为单台机组，将集电参数 Z_1 、 Z_2 等值为 Z_{eq1} 。原两机模

型在节点c的输出功率为

$$S'_c = S_1 + S_2 - 2(\Delta S_T - \Delta S_{Y\Delta}) - \left(\frac{S_a}{U} \right)^2 Z_1 - \left(\frac{S_a - \Delta S_{Z_1} + S_b}{U} \right)^2 Z_2 \quad (4)$$

图2b电路示意图可知，将两台机组等值后在节点c的等值输出功率 $S'_{(c)}$ 为

$$S'_{(c)} = S_1 + S_2 - \Delta S_{2T} - \Delta S_{2Y\Delta} - \left(\frac{S_a + S_b}{U} \right)^2 Z_{eq1} \quad (5)$$

式中， ΔS_T 、 $\Delta S_{Y\Delta}$ 分别为单台机组直接相接的变压器损耗和电缆线路接地电容损耗； ΔS_{2T} 、 $\Delta S_{2Y\Delta}$ 分别为两机组的等值模型的等值变压器损耗和等值接地电容损耗； U 为母线电压。

遵循电缆线路损耗不变的原则，可知式(4)与式(5)相等，可得

$$Z_{eq1} = Z_2 + \frac{S_a^2 Z_1 + \Delta S_{Z_1}^2 Z_2 - 2(S_a + S_b)\Delta S_{Z_1} Z_2}{(S_a + S_b)^2} \quad (6)$$

由于 $\Delta S_{Z_1} \ll (S_a + S_b)$ 因此上式简化为

$$Z_{eq1} = Z_2 + \left(\frac{S_a}{S_a + S_b} \right)^2 Z_1 \approx Z_2 + \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right)^2 Z_1 \quad (7)$$

上述推导可扩展至多台机组等值为单机模型集电网络参数的等值过程，以图2a所示的4台风电机集电参数等值为 Z_{eq} 的过程如下

$$\begin{cases} Z_{eq1} = Z_2 + \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right)^2 Z_1 \\ Z_{eq2} = Z_3 + \left(\frac{S_1 + S_2}{S_1 + S_2 + S_3} \right)^2 Z_{eq1} \\ Z_{eq3} = Z_4 + \left(\frac{S_1 + S_2 + S_3}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \right)^2 Z_{eq2} \\ Z_{eq} = Z_5 + \left(\frac{S_1 + S_2 + S_3 + S_4}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5} \right)^2 Z_{eq3} \end{cases} \quad (8)$$

3.2 放射式接线网络等值

若多台风机以放射式接线形式接入并网点，如图3所示。

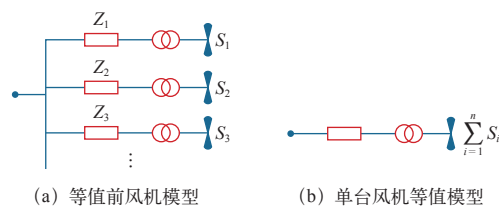


图3 放射式接线机组等值模型

由线路损耗量一致原则可得, n 台风电机组作单机等值时集电线路参数等值计算表达式为

$$Z_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i^2 Z_i}{\left(\sum_{i=1}^n S_i\right)^2} \quad (9)$$

4 直流近区风电场暂态过电压

4.1 典型风电场集电参数建模

搭建直流输电近区典型风电场A, 由33台1.5 MW双馈风电机组组成, 如图4所示。

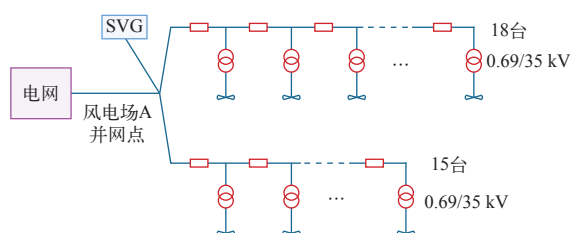


图4 49.5 MW风电场仿真模型

以风电场集电网络损耗一致为原则, 可得风电场A单机等值模型的集电网络参数值, 如下表所示。系统基准容量选择100 MW。考虑集电参数的等值模型能够与详细模型保持损耗、并网点输送功率和电压的一致性, 稳态仿真结果如表2所示, 其中 U_{CPP} 指并网点电压。

表1 等值模型集电参数

	标么值/(pu)
电缆线路阻抗	0.038 76 + j0.069 28
电缆接地电容	j0.000 66

表2 风电场稳态等值效果

电场出力	详细模型			等值模型		
	U_{CPP}/kV	$\Delta P/MW$	$\Delta Q/MVar$	U_{CPP}/kV	$\Delta P/MW$	$\Delta Q/MVar$
16.5 MW	35.07	0.464	0.8	35.07	0.473	0.8
29.7 MW	35.08	0.817	2.1	35.08	0.846	2.1
36.3 MW	35.08	1.076	3.0	35.08	1.118	3.1
49.5 MW	35.08	1.749	5.4	35.08	1.826	5.5

4.2 直流连续两次换相失败

搭建如图5所示直流输电系统及近区电网结构, 简化节点1、2、3和4的风电场及负荷, 风电场A与其他风电场汇集后接入换流站甲, 经特高压

直流外送至换流站乙, 供电给该区域负荷。研究换相失败引起暂态过电压对直流近区风电场的影响, 评估机组耐压能力, 以风电场A为例。图5系统中换流站的额定输电电压 ± 800 kV, 其输电能力达8 000 MW, 将地区甲的丰富风电资源送至乙地高负荷区供电。换流站近区大量风电场汇集, 短路容量低, 缺乏常规机组支撑, “弱送端”问题突出。

直流输电联络线的安全稳定仿真分析时, 由于直流近区交流系统故障, 导致直流换相失败是输电线路常见现象, 严重情况下甚至会引起多回直流同时换相失败。由于直流换相失败造成功率反送, 并网点出现过电压, 直流近区风电场电压调节能力不足, 系统电压波动超出风机稳定运行范围, 易引发连锁反应^[16]。

仿真直流两次换相失败期间, 风电场A并网点电压与风机机端电压曲线, 如图6所示。其中近端风机指临近并网点的风电机组, 远端风机指与并网点电气距离最远的风电机组。

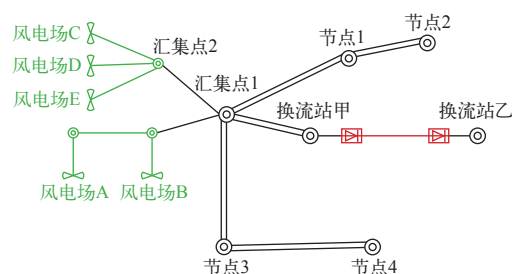


图5 风电直流送端网架结构

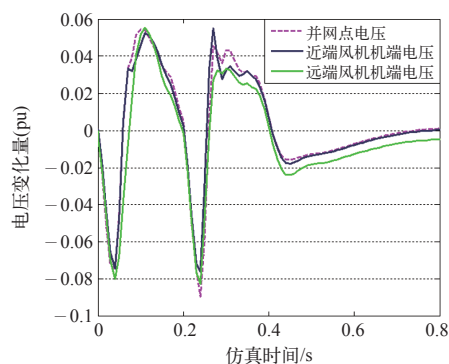


图6 直流两次换相失败

由仿真曲线可知, 风电场A并网点电压增幅两次分别达0.055 (pu)和0.05 (pu), 第一次过电压时近端和远端风机机端电压变化量相差不大, 约

0.055 (pu), 第二次过电压时近端与远端风机电压变化量分别为0.055 (pu)、0.03 (pu), 相差约0.025 (pu)。换相失败期间, 考虑集电参数功率损耗的影响, 风电场内部机组端电压特性各有差异, 第二次过电压时远端机组电压幅度变化最大值小于近端机组电压, 典型49.5 MW风电场模型中, 两者相差约额定电压的2.5%。

4.3 暂态过电压时风电场等值模型输出特性

工程分析计算时采用风电场的单机模型, 不考虑内部集电参数的损耗, 由前文可知, 在分析直流近区风电机组过电压情况时, 忽略集电参数等值会造成风电场模型的仿真结果有一定的偏差, 尤其是暂态过电压时机端电压波动。

建立几种风电场A模型, 包括考虑集电参数损耗和忽略集电参数的等值模型, 以及原风电场详细模型, 仿真两次换相失败期间风电场模型中机端电压曲线如图7所示。

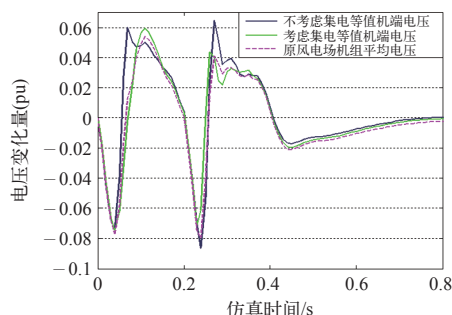


图7 两次换相失败期间电压曲线对比

图7中比较直流两次换相失败期间近区风电场两种等值模型的机端电压, 第一次过电压时两种等值模型机端电压增幅相同, 过电压时刻稍有偏差; 第二次过电压时, 考虑集电参数损耗等值模型的机端电压增幅较工程计算的等值模型高约0.025 (pu)。与原风电场机组比较可知, 考虑集电参数等值的模型机端电压特性更接近实际风电机组平均过电压水平, 而不考虑集电参数等值模型机端电压增幅, 比实际风电场平均电压的变化量高约0.025 (pu)。因此, 分析风电场各机组暂态过电压时不能忽略集电参数的影响。

通过本节的仿真结果可知, 直流近区风电场

暂态过电压过程中, 与并网点不同电气距离的风电机组过电压水平有一定差异。第一次换相失败过电压时, 机端电压变化量差别不大, 第二次过电压时近端风机电压升高至0.055 (pu), 而远端风机电压升高至0.03 (pu)。当并网点过电压值相同时, 对比不同等值模型差异可得, 不考虑集电网络参数等值机组机端电压变化量约为0.065 (pu), 按照本文算法考虑集电网络参数等值时, 机端电压增幅更接近机组平均电压增幅。典型风电场模型分析表明, 直流近区风电场建模考虑到集电参数损耗的影响, 电场内不同机组过电压水平相差约额定电压的2.5%。

5 结束语

针对直流近区风电场的集电参数等值建模问题, 研究换相失败等大扰动下发生暂态过电压时, 风电场功率特性、机端电压与等值集电线路阻抗的联系。本文提出一种考虑损耗的集电网络等值方法, 保证了等值前后网络损耗相等。以实际电网为例, 分别仿真近区风电场三种模型在连续两次换相失败后风电场电压增幅曲线。

具体结论如下:

1) 稳态仿真结果表明, 考虑集电参数损耗的等值模型与实际风电场的功率损耗、平均电压特性基本保持一致。

2) 并网点第一次暂态过电压时, 各机组电压增幅相差不大; 第二次暂态过电压时, 风电场内各机组机端电压水平受集电参数的影响, 远端机组电压幅度变化最大值小于近端机组电压, 电场内不同机组过电压水平相差为额定电压的2.5%左右。

3) 考虑集电参数损耗建立直流近区风电场的等值模型, 仿真结果表明直流换相失败后, 等值模型中风电机组机端电压特性更接近原风电场机组平均电压。

本文提出的考虑集电参数的风电场等值建模对于直流近区大规模光伏电站、水电站的集电参数等值也同样适用。当分析直流扰动引起近区电场并网点过电压时, 电场内各机组过电压水平不同。因此本文建立的集电参数等值方法, 利于准

确评估电网电压波动时电场机组的平均过电压能力,提高了风电场暂态仿真模型的准确度。

参考文献

- [1] 陈树勇, 常晓鹏, 等. 风电场接入对电力系统阻尼特性的影响 [J]. 电网技术, 2013, 37 (6): 1570-1577.
- [2] 迟永宁. 大型风电场接入电网的稳定性问题研究 [D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
- [3] 王峰, 刘天琪, 丁媛媛, 等. 直流闭锁引起的暂态过电压计算方法及其影响因素分析 [J]. 电网技术, 2016, 40 (10): 3059-3065.
- [4] 刘斯伟, 李庚银, 周明. 双馈风电机组对并网电力系统暂态稳定性的影响模式分析 [J]. 电网技术, 2016, 40 (2): 471-476.
- [5] 年珩, 易曦露. 面向直流输电的双馈风电机组并网拓扑及控制技术 [J]. 电网技术, 2014, 38 (7): 1731-1738.
- [6] 丁明, 李宾宾, 等. 双馈风电机组运行方式对系统电压稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2010, 34 (10): 26-31.
- [7] Akhmatov V. Analysis of dynamic behavior of electric power systems with large amount of wind power [D]. Technical University of Denmark, April, 2003.
- [8] 李新年, 易俊, 李柏青, 等. 直流输电系统换相失败仿真分析及运行情况统计 [J]. 电网技术, 2012 (6): 266-271.
- [9] 陈钊, 夏安俊, 等. 适用于低电压穿越仿真的风电场内集电线路等值方法 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40 (8): 51-56.
- [10] 贺静波, 庄伟, 许涛, 等. 暂态过电压引起风电机组连锁脱网风险分析及对策 [J]. 电网技术, 2016, 40 (6): 1839-1844.
- [11] 夏玥, 李征, 等. 基于直驱式永磁同步发电机组的风电场动态建模 [J]. 电网技术, 2014, 38 (6): 1439-1445.
- [12] 张星, 李龙源, 等. 基于风电机组输出时间序列数据分群的风电场动态等值 [J]. 电网技术, 2015, 39 (10): 2788-2793.
- [13] 高峰, 赵东来, 等. 直驱式风电机组风电场动态等值 [J]. 电网技术, 2012, 36 (12): 222-227.
- [14] Feijdo A E, Cidris J. Modeling of wind farms in the load flow analysis [J]. IEEE Transaction on Energy Convexion, 2000, 15 (1): 110-115.
- [15] Akhmatov V, Knudsen H. An aggregate model of a grid-connected, large-scale off shore wind farm for power stability investigations-importance of windmill mechanical system [J]. Electrical Power Energy Systems, 2002, 24 (9).
- [16] 孙华东, 张振宇, 林伟芳, 等. 2011 年西北电网风机脱网事故分析及启示 [J]. 电网技术, 2012 (10): 76-80.

(收稿日期: 2018-02-11) **EA**

(上接第57页)

- multi-DG configurations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29 (2): 785-793.
- [8] 吕志鹏, 罗安, 周柯, 等. 静止同步补偿器与微网在配电网无功电压协同控制中的联合运用 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (增刊): 18-24.
- [9] Li Qiang, Chen Feixiong, Chen Minyou, et al. Agent-based decentralized control method for islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7 (2): 637-649.
- [10] Chen Feixiong, Chen Minyou, Li Qiang, et al. Multiagent-based reactive power sharing and control model for islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7 (3): 1232-1244.
- [11] Bidram A, Lewis F L, Davoudi A. Distributed control systems for small-scale power networks: using multiagent cooperative control theory [J]. IEEE Control Systems, 2014, 34 (6): 56-77.

(收稿日期: 2018-02-12) **EA**