

考虑网络损耗的直流近区风电场 集电参数等值建模

张新宇¹, 赵义松¹, 苑经纬¹, 杜威¹, 李佳奇¹, 齐郑²

(1. 辽宁电力科学研究院设备状态评价中心, 辽宁 沈阳 110006; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: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, 风电场集电参数对过电压水平的影响不容忽视。在此背景下, 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, 首先提出一种考虑损耗的风电场集电网络等值建模方法, 然后量化研究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动态输出特性。结果表明: 并网点过电压时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, 因此, 必须考虑风电场集电参数等值; 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, 具有实际应用价值。

关键词: 直流近区; 暂态过电压; 损耗; 集电参数

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.06.015 中图分类号: TM743 文章编号: 1673-9140(2020)06-0117-07

Research on equivalent modeling of collecting parameters of DC near-field wind farms considering network losses

ZHANG Xinyu¹, ZHAO Yisong¹, YUAN Jingwei¹, DU Wei¹, LI Jiaqi¹, QI Zheng²

(1. Equipment Condition Evaluation Center, Liaoning Electric Power Research Institute, Shenyang 110006, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The characteristics of DC power transmission have reciprocal effects on wind farms and it would possibly give rise to the transient overvoltage. The influence of collector parameters on overvoltage level in wind farms cannot be ignored. Under this background, for the modeling problem of wind farm near the DC region, this paper firstly proposes an equivalent modeling method considering power loss of collector networks by combining the power characteristics of transient overvoltage. And then, the effect of collector parameters on the generator terminal overvoltage can be quantified. Finally, the actual grid is included as an example. The characteristics of transient overvoltage and output characteristic of equivalent model are analyzed by simulating the case of two continuous commutation failures of HVDC system. It is shown that the variation of generator terminal voltage in the far-end wind turbines is lower than that of the near-end, and the difference is about 2.5% compared to the rated voltage. Therefore, it is necessary to consider the collector parameter equivalence of wind farms. Meanwhile, the power loss and average voltage of this

收稿日期: 2017-08-02; 修回日期: 2017-10-28

基金项目: 国网辽宁省电力有限公司科技项目(2017YF-9)

通信作者: 张新宇(1971-), 男, 高级工程师, 主要从事配电网自动化的研究; E-mail: chthtc@163.com

equivalent wind farm model in this paper are fairly remain consistent with that of actual model, so that it has a certain practical application value.

Key words: near DC region; transient overvoltage; power loss; collector parameters

中国大型风电场主要分布在风能资源丰富的“三北”地区,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]。

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,由于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。目前由于实际风电机组的高低电压耐受能力较差,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^[5-8]。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连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群高电压连锁脱网特性相,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精度的影响,进行暂态仿真时,不能忽略线路损耗造成的误差。

该文以损耗一致为原则,提出一种考虑损耗的风电场集电网络等值方法,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,整流侧消耗无功大幅度减少,交流滤波器大量无功反送,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 p. u.^[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连锁脱网的风险^[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 中并网点电压为 \dot{U}_{CPP} ,机端电压为 \dot{U} ,输出功率为 $P_p - jQ_p$,无功功率反送。

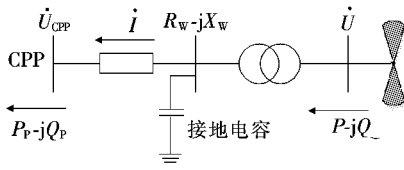


图 1 单机模型

Figure 1 Single-machine model

当并网点电压 \dot{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,则机组机端电压为

$$\dot{U} = \dot{U}_{CPP} + \frac{(R_w + jX_w)}{\dot{U}_{CPP}} \cdot (P_P + jQ_P) \quad (1)$$

其电压增量表示为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U} &= \Delta \dot{U}_{CPP} + (R_w + jX_w) \Delta \dot{I} = \\ & \Delta \dot{U}_{CPP} + (R_w + jX_w) \cdot \\ & \left[\frac{\Delta P_P + j\Delta Q_P}{\dot{U}_{CPP}} - \Delta \dot{U}_{CPP} \frac{P_P + jQ_P}{\dot{U}_{CPP}^2} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

由式(1)、(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,考虑到变压器电压损耗和功率损耗的影响,故造成机端电压 \dot{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。

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。

该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,接地电容不容忽略,其等值接地电容 Y_{Δ} 表示为

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

式中 $Y_{\Delta i}$ 为连接单台机组的电缆线路接地电容。

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,该文针对 2 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,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,风电机组功率及集电参数表示如图 2 所示。

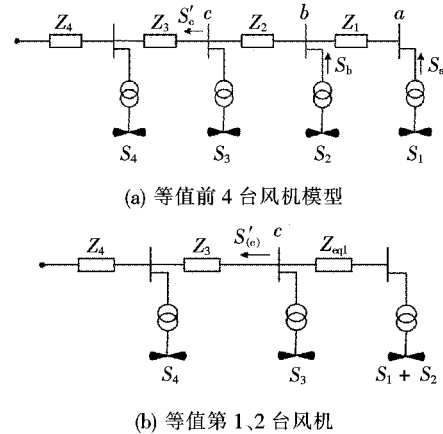


图 2 干线式接线机组等值模型

Figure 2 Equivalent model of trunk wiring unit

如图 2(a)所示,首先将风电机组 1、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

$$\begin{aligned} S'_c &= S_1 + S_2 - 2 \times (\Delta S_T - \Delta S_{Y_{\Delta}}) - \\ & \left(\frac{S_a}{U} \right)^2 \cdot Z_1 - \left(\frac{S_a - \Delta S_{Z_1} + S_b}{U} \right)^2 \cdot Z_2 \end{aligned} \quad (4)$$

由图 2(b)电路示意可知,将 2 台机组等值后在节点 c 的等值输出功率为

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

式(4)、(5)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,则

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

由于 $\Delta S_{Z_1} \ll (S_a + S_b)$, 因此,式(6)简化为

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

式(4)~(6)的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 2(a)所示的 4 台风电机组集电参数等值为 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,则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:

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

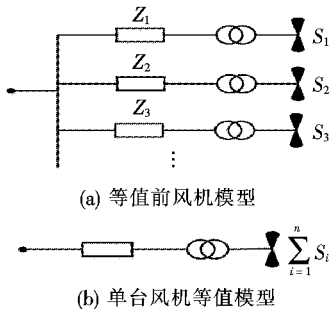


图 3 放射式接线机组等值模型

Figure 3 Equivalent model of radiative wiring unit

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。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,如表 1 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} 为并网点电压。

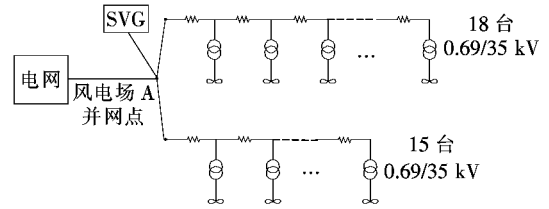


图 4 49.5 MW 风电场仿真模型

Figure 4 49.5 MW wind power simulation model

表 1 等值模型集电参数

Table 1 Equivalent model parameters

集电网络参数	标幺值/p. u.
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

Table 2 Effect of steady-state equivalent wind

电场 出力/ MW	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	35.07	0.464	0.8	35.07	0.473	0.8
29.7	35.08	0.817	2.1	35.08	0.846	2.1
36.3	35.08	1.076	3.0	35.08	1.118	3.1
49.5	35.08	1.749	5.4	35.08	1.826	5.5

4.2 直流连续 2 次换相失败

搭建如图 5 所示的直流输电系统及近区电网结构,简化节点 1~4 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为 ± 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。

在进行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 2 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。

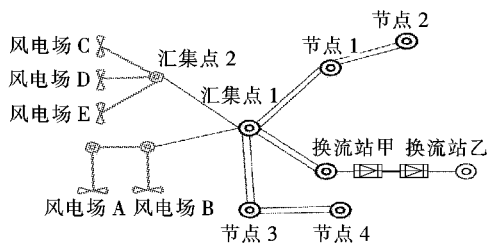


图 5 风电直流送端网架结构

Figure 5 Sending power grid structure of DC transmission

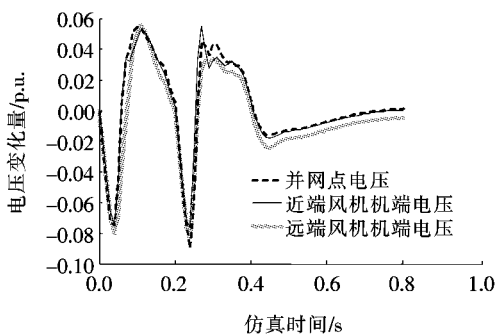


图 6 直流 2 次换相失败

Figure 6 Two continuous commutation failures of HVDC

由仿真曲线可知,风电场 A 并网点电压增幅 2 次,分别达到 0.055、0.05 p.u.,第 1 次过电压时近端和远端风机机端电压变化量相差不多,约 0.055 p.u.,第 2 次过电压时近端与远端风机电压变化量分别为 0.055、0.03 p.u.,相差 0.025 p.u.。在换相失败期间,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 2 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,在

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,由第 2 节内容可知,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 2 次换相失败期间风电场模型中机端电压曲线如图 7 所示。

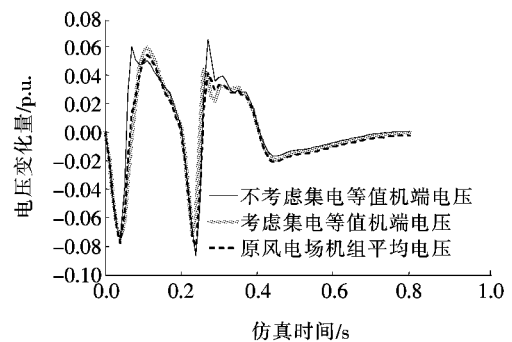


图 7 2 次换相失败期间电压曲线对比

Figure 7 Voltage curve comparison during twice commutation failures

根据图 7,可以比较直流 2 次换相失败期间近区风电场 2 种等值模型的机端电压,在第 1 次过电压时,2 种等值模型机端电压增幅相同,过电压时刻稍有偏差;在第 2 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 p.u.。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 p.u.,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 1 次换相失败过电压时机端电压变化量差别不大,第 2 次过电压时近端风机电压升高至 0.055 p.u.,而远端风机电压升高至 0.03 p.u.。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 p. u.,按照该文算法,当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。该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,得出结论:

1) 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,而该文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。

2) 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,具有实际应用价值。

该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过电压时,电场内各机组过电压水平不同。因此,该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,孙华东,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.
CHEN Shuyong, CHANG Xiaopeng, SUN Huadong, et al. Impact of grid-connected wind farm on damping performance of power system[J]. Power System Technology, 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] 卢一菲,陈冲,金成日,等. 直驱永磁风电机组高电压穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(15):50-60.
LU Yifei, CHEN Chong, JIN Chengri, et al. HVRT coordinated control strategy of a direct-driven PMSG[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 50-60.
- [4] 张兴,孙艳霞,李丽娜,等. 风电机组电磁暂态建模及验证[J]. 中国电力,2020,53(7):106-112.
ZHANG Xing, SUN Yanxia, LI Lina, et al. Electromagnetic transient modelling and verifying of wind turbine generator[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 106-112.
- [5] 张炎,丁明,韩平平,等. 直流闭锁后风电送端系统暂态稳定及控制策略研究[J]. 电工技术学报,2020,35(17):3714-3726.
ZHANG Yan, DING Ming, HAN Pingping, et al. Study on the transient stability and control schemes of the sending-end system involving wind power after UHVDC block[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(17): 3714-3726.
- [6] 苗文静,高瑜,刘其辉,等. 基于风电变模式运行与 OLTC 协调的配电网电压控制策略[J]. 智慧电力,2019,47(11):48-53.
MIAO Wenjing, GAO Yu, LIU Qihui, et al. Voltage control strategy for distribution network based on wind power variable mode operation and coordination with OLTC[J]. Smart Power, 2019, 47(11): 48-53.
- [7] Akhmatov V. Analysis of dynamic behavior of electric power systems with large amount of wind power[D]. Copenhagen: Technical University of Denmark, 2003.
- [8] 邓争,刘国荣,张真源,等. 基于虚拟同步机的双馈风电机组自适应控制[J]. 电网与清洁能源,2020,36(8):73-81.
DENG Zheng, LIU Guorong, ZHANG Zhenyuan, et al. Adaptive control of doubly-fed wind turbines based on virtual synchronizer[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(8): 73-81.
- [9] 陈钊,夏安俊,汪宁渤,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.
CHEN Zhao, XIA Anjun, WANG Ningbo, et al. Collector network equivalent method of wind farm for low

- voltage ride through simulation[J]. Automation of Electric Power System, 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.
- HE Jingbo, ZHUANG Wei, XU Tao, et al. Study on cascading tripping risk of wind turbines caused by transient overvoltage and its countermeasures[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1839-1844.
- [11] 夏玥,李征,蔡旭,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.
- XIA Yue, LI Zheng, CAI Xu, et al. Dynamic modeling of wind farm composed of direct-driven permanent magnet synchronous generators[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1439-1445.
- [12] 张星,李龙源,胡晓波,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.
- ZHANG Xing, LI Longyuan, HU Xiaobo, et al. Wind farm dynamic equivalence based on clustering by output time series data of wind turbine generators[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2788-2793.
- [13] 郑小革,王春风,王境彪,等. 含直驱风电场的交直流混合系统非强阻尼低频振荡特性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 148-154.
- ZHENG Xiaoge, WANG Chunfeng, WANG Jingbiao, et al. Analysis of the weak or negative damp low-frequency oscillation characteristics in AC/DC system integrated by PSMG based wind farms[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 148-154.
- [14] Feijido A E, Cidris J. Modeling of wind farms in the load flow analysis[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 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]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24(9): 89-96.
- [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, 36(10): 76-80.
- SUN Huadong, ZHANG Zhenyu, LIN Weifang, et al. Analysis on serious wind turbine generators tripping accident in northwest china power grid in 2011 and its lessons[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 76-80.