

多种风电渗透率下虚拟转动惯量 辅助调频研究

苗璐, 高海翔, 易杨, 林建熙, 王延纬, 龙霏, 吴国炳

(广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600)

摘要: 与常规发电机组不同, 风力发电机组的转速与电网频率完全解耦。风机大规模并网后, 系统的转动惯量降低, 抵御频率扰动的能力减弱。为提升系统的安全稳定裕度, 应使风机具有虚拟转动惯量并辅助电网调频。提出了风机虚拟转动惯量的控制方法, 在不同风电渗透率工况下利用电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC开展仿真工作。仿真结果表明, 所提出的控制策略增加了风电机组的虚拟转动惯量, 使风机具有类似于常规机组的动态响应特性, 从而提升了含风电并网的电力系统暂态稳定性。

关键词: 虚拟转动惯量; 风电机组; 辅助调频; 电磁暂态仿真

A research on virtual rotating inertial-support frequency regulation under varied wind power penetration levels

MIAO Lu, GAO Haixiang, YI Yang, LIN Jianxi, WANG Yanwei, LONG Fei, WU Guobing

(Electric Power Dispatching and Control Center of Guangdong Power Grid, Guangzhou 510600, China)

Abstract: Different from conventional generators, the wind turbines are decoupled with the power grid frequency. When large scaled of wind power integrated in the power system, the grid rotating inertial is decreased, the ability to keep frequency stability is declined. In order to keep the system operation stability, the wind turbines should have virtual rotating inertial to support the power grid frequency. This paper put forward a control method to increase the wind turbine virtual rotating inertial. By the electromagnetic simulation software PSCAD/EMTDC, various cases of different wind power penetration are simulated. The results show the method could increase the wind turbine inertial and make the wind turbine have the same dynamic feature as the conventional generators. The method supposed by this paper could largely increase the system stability within large scale of wind power integrated.

Key words: virtual rotating inertial; Wind turbine; frequency support; electromagnetic simulation

0 引言

广东省是我国海上风力资源最为丰富的省份, 2020年广东省海上风电装机达到200万kW, 预计2022、2023年新增装机分别达1 095万kW、

1 295万kW。按照广东省目前的用电最大负荷及未来十年的增长速度预测, 2030年海上风电装机规模将占广东省最大用电负荷的25%以上; 若电网运行在枯水期、小方式情况下, 海上风力发电

中国南方电网有限责任公司重点项目“大规模海上风电接入广东电网的并网运行关键技术研究 - 课题1: 大规模海上风电接入的受端电网稳定特性及稳定控制技术研究”(GDKJXM20198236)资助

在广东省用电总负荷中的占比甚至可能达到30%以上。

频率稳定性降低是大规模风电给电网带来的巨大挑战之一^[1]。尽管风电功率具有随机性和波动性，但风电机组能利用转子侧换流器的变速恒频控制捕获风能，实现最大风功率跟踪。由于系统的频率和风机的转速完全解耦，风电机组不能像常规发电机组那样具有转动惯量^[2]。在电网发生频率扰动时，风电机组不能响应系统频率变化，无法增加系统的转动惯量。随着风机占比的不断增加，电网的转动惯量将大幅度降低，从而威胁系统安全稳定运行^[3]。为减少风机并网对系统造成的影响，风机需具备辅助系统调频的能力^[4]。

研究表明，在风电机组上增加辅助控制可使风机具备虚拟转动惯量，已有文献通过控制风机转速提高风机的调频能力。主流的控制方法包括风机桨距控制、系数下垂控制和同步机控制等。这些方法通过改变风机转子的转速，释放转子内存储的动能，形成暂时的能量支撑辅助电网调频。上述控制的效果与风电机组运行状态紧密相关，风机转速较低时，转子存储的动能较低，故辅助频率调控效果有限。文献[5-6]指出，风机渗透率较高的工况下，上述方法会造成电网的频率二次下跌。储能技术的快速发展为增加风电机组的虚拟转动惯量提供了手段，可使风电场具有类似于常规机组的动态响应特性，降低风电接入对电力系统暂态稳定性的负面影响。

为实现风机辅助电网调频，本文提出了利用虚拟转动惯量辅助电网调频的控制方法，在电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC下实现多种风电渗透率工况控制效果对比。本文所提的方法可为大规模风电并网后的安全稳定运行提供参考。

1 风机的虚拟转动惯量控制

1.1 常规风电机组转动惯量响应

在电网发生频率扰动时，机组转速相应变化，释放转子动能短时支撑功率缺额。对于单台发电机，其转子所储存的动能与其转动惯量相关，即

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (1)$$

式中， J 为转动惯量； ω 为机械角速度。

通常也可用惯性时间常数 T_j 或惯性常数 H 评估发电机转子动能，其关系为

$$T_j = 2H = 2 \frac{E_k}{S_B} = 2 \frac{J \omega^2}{2S_B} \quad (2)$$

式中， S_B 为系统总装机。

图1为典型的四机两区系统（系统参数见文献[7]）。设 $t=3$ s时，系统发生了0.1（pu）的有功缺额，分别在区域1的转动惯量时间常数 $T_j=4$ s、6 s、10 s、14 s和18 s的情况下，仿真得到系统频率变化量如图2所示。

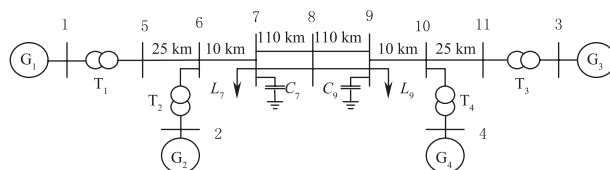


图1 四机两区系统图

Fig. 1 The four-generators two-areas system

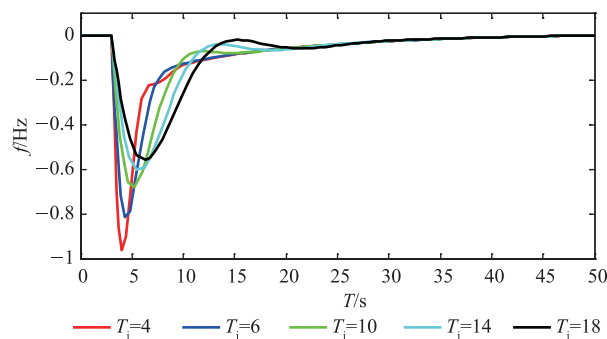


图2 频率-惯性时间常数曲线

Fig. 2 Frequency-inertial constant diagram

由图2可见，随着系统转动惯量的增加，系统频率的跌落幅值减少。在 $T_j=4$ s时系统频率跌落幅值最大，而在 $T_j=18$ s时系统频率下跌幅值最小。

由此可见，系统的转动惯量和对频率抗扰能力紧密相关。在相同的扰动工况下，转动惯量大的系统频率跌落较小。因此，提高电力系统转动惯量可以增强电网抵御频率扰动的能力。

1.2 风电机组虚拟转动惯量附加控制

双馈感应发电机组（Doubly Fed Induction

Generator, DFIG) 是一种典型的风力发电机组, 转子侧通过换流器实现最大风功率跟踪。大规模风电并网后, 风功率 P_{wind} 和系统频率 f 之间关系如下

$$2H \frac{d\Delta f}{dt} = P_G - P_L + P_{\text{wind}} - D\Delta f \quad (3)$$

式中, P_G 为常规机组功率; P_L 为负荷功率; D 为频率控制系数。

风机虚拟惯量附加控制如图3所示, 加该环节后, 风功率 P_{wind} 表达式为

$$P_{\text{wind}} = P_{\text{ord}} - k \frac{d\Delta f}{dt} \quad (4)$$

式中, P_{ord} 为风机输出功率指令; k 为频率微分控制系数。

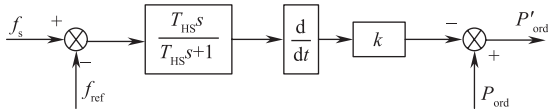


图3 风机虚拟转动惯量控制

Fig. 3 Wind turbine virtual inertial control

将式(4)代入式(3)整理得到

$$(2H + k) \frac{d\Delta f}{dt} = P_G - P_L + P_{\text{ord}} - D\Delta f \quad (5)$$

在式(5)中, 风电机组加入虚拟控制环节后, 系统的转动惯量由 H 变为 $H+k/2$, 系统的转动惯量得到增加。

2 风机-储能系统的虚拟转动惯量控制

2.1 风机-储能模型及虚拟转动惯量

储能可以与风电机组配合, 提高大规模风电并网情况下电力系统的稳定性。本文中储能经电压源型换流器(VSC)安装在风机并网点处, 如图4所示。

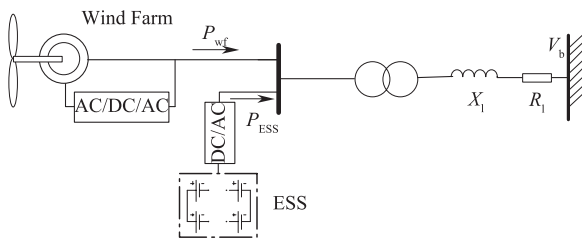


图4 风机-储能联合系统

Fig. 4 Wind turbine-ESS system

按照电力系统分析中同步发电机惯性常数 H_G 的定义, 含储能装置的风电场的虚拟转动惯量可表示为

$$H_G = [\sum_{i=1}^n E_{wi} + E_{ESS}] / S_{wf} \quad (6)$$

式中, n 为风机个数; E_{wi} 为第 i 台风机存储的动能; E_{ESS} 为储能装置释放的能量; S_{wf} 为风机的额定容量。

2.2 风机-储能系统的虚拟转动惯量控制

风电机组转子动能与风机运行工况紧密相关, 若风机处在转速较低的工况下, 则存储的转子动能较低, 辅助频率调控效果有限。对此, 本文提出了储能提供虚拟转动惯量的策略, 其控制逻辑如图5所示。

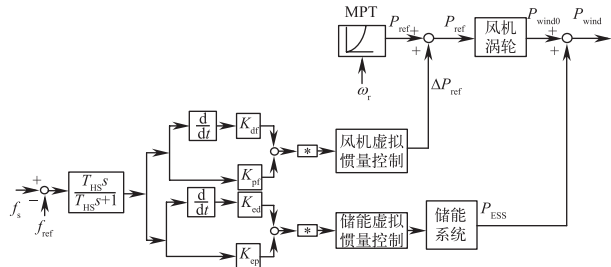


图5 风机-储能虚拟转动惯量控制

Fig. 5 Wind turbine-ESS virtual inertial control

图5中控制逻辑包含风机虚拟惯量控制和储能虚拟惯量控制。当风电机组转速较低时, 不适合采用风机虚拟转动惯量控制, 而是触发储能虚拟转动惯量控制模式。

3 仿真实证

3.1 系统结构

为实现风机的虚拟转动惯量辅助调频研究, 本节在磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC中搭建了如图6所示的仿真算例(系统详细参数见文献[5]), 仿真将针对不同风机渗透率工况(10%、20%、30%和40%)。设系统在5 s时增加120 MW负荷, 用于模拟系统中的负荷波动。分别验证所提出的风机本体控制与风储控制对系统虚拟转动惯量的增加效果。

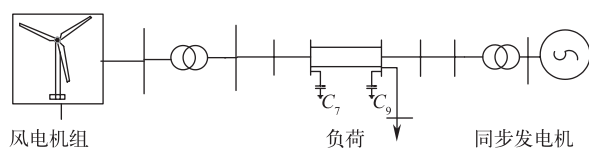


图6 仿真算例

Fig. 6 Simulation system

3.2 10%风机渗透率

本工况中，风电机组出力260 MW，风机渗透率为10%。分别采用风机虚拟惯量控制和风机-储能虚拟惯量控制的仿真结果如图7、图8所示。

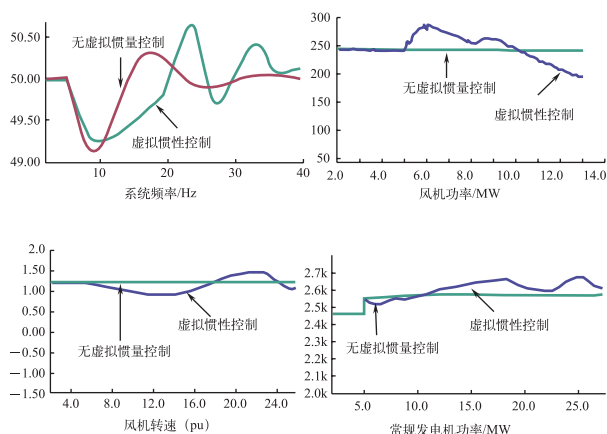


图7 10%工况下风机虚拟转动惯量控制

Fig. 7 10% cases wind turbine virtual inertial control

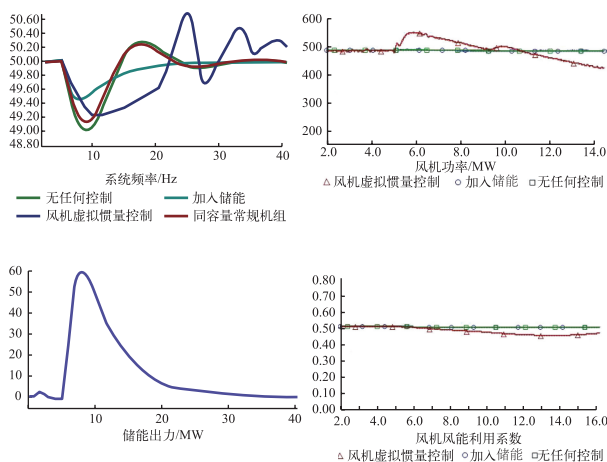


图8 10%工况下风机-储能虚拟转动惯量控制

Fig. 8 10% cases wind turbine-ESS virtual inertial control

由仿真结果可看出，风机渗透率较低时，系统抵抗频率扰动能力较强，风机虚拟转动惯量与风机-储能虚拟转动惯量均有较好的控制效

果，但风机-储能虚拟转动惯量具有更好的响应速率。

3.3 20%风机渗透率

本工况中，风机渗透率为20%，风电机组出力500 MW。分别采用风机虚拟惯量控制和风机-储能虚拟惯量控制的仿真结果如图9、图10所示。

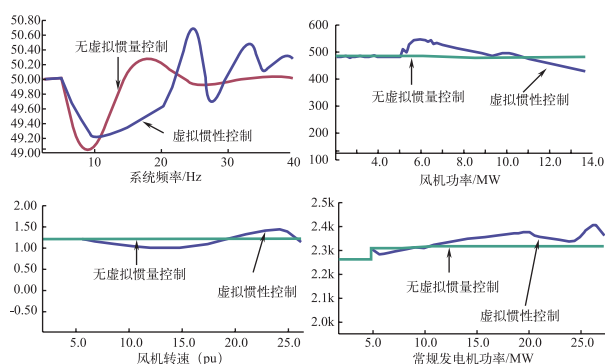


图9 20%工况下风机虚拟转动惯量控制

Fig. 9 20% cases wind turbine virtual inertial control

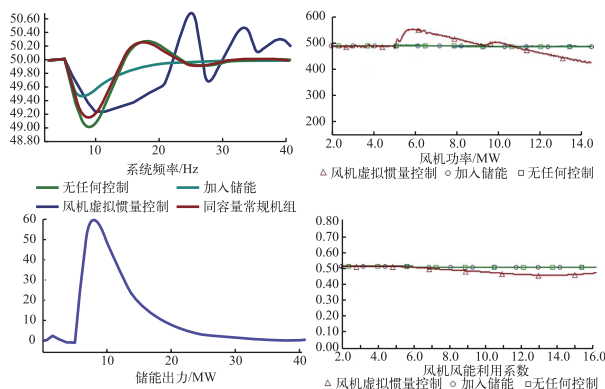


图10 20%工况下风机-储能虚拟转动惯量控制

Fig. 10 20% cases wind turbine-ESS virtual inertial control

仿真结果可以看出，当渗透率逐渐上升时，系统对频率的抗扰动能力减弱。风机虚拟转动惯量控制中，风机需释放更多的转子动能以支撑系统频率恢复。

3.4 30%风机渗透率

本工况中，风机渗透率为30%，风电机组出力800 MW。分别采用风机虚拟惯量控制和风机-储能虚拟惯量控制的仿真结果如图11、图12所示。

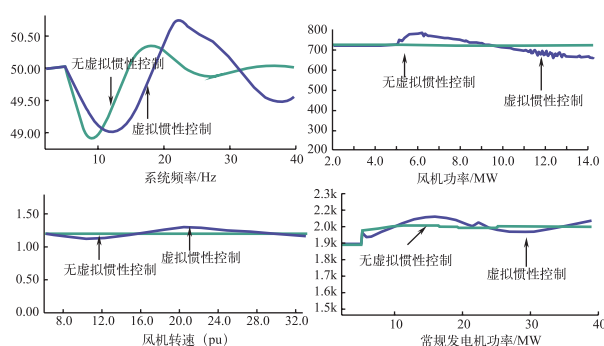


图 11 30% 工况下风机虚拟转动惯量控制

Fig. 11 30% cases wind turbine virtual inertial control

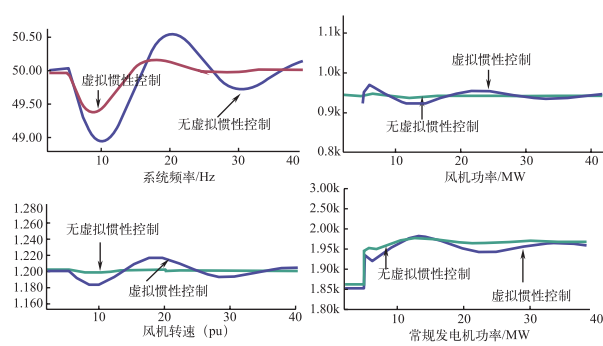


图 13 40% 工况下风机虚拟转动惯量控制

Fig. 13 40% cases wind turbine virtual inertial control

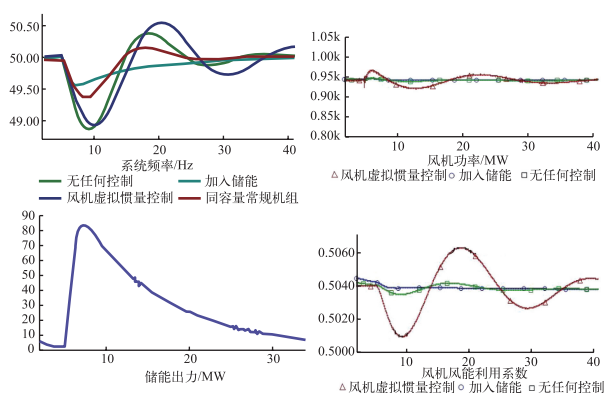


图 12 30% 工况下风机-储能虚拟转动惯量控制

Fig. 12 30% cases wind turbine-ESS virtual inertial control

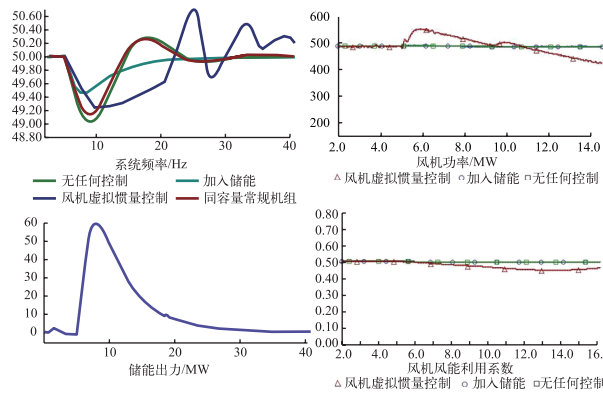


图 14 40% 工况下风机-储能虚拟转动惯量控制

Fig. 14 40% cases wind turbine-ESS virtual inertial control

由仿真结果可以看出，高风机渗透率工况下，系统频率下跌谷值更低，仅采用风机虚拟惯量控制可提高系统频率，但存在明显不足：采用风机-储能虚拟惯量控制，频率控制效果不受限于风机的运行状态。该控制不仅能平抑频率波动，而且能提高系统响应速度，避免风机转速恢复对系统的二次扰动。

3.5 40%风机渗透率

本工况中，风机渗透率为40%，风电机组出力1 000 MW。分别采用风机虚拟惯量控制和风机-储能虚拟惯量控制的仿真结果如图13、图14所示。

40%风机渗透率工况下，风机占比进一步上升，风机-储能虚拟转动惯量控制优势更加明显。由10%~40%四组仿真结果可得，仅采用风机虚拟惯量控制可提高系统频率，但存在明显不足：当风机运行在较高转速时，控制器参数接近

饱和，风机虚拟惯量控制效果受限；当风机转速较低时，由于转子能量低，无法对频率起到很高的支撑效果。在转速恢复的过程中，风机从系统吸收功率，造成系统频率再次跌落。

采用风机-储能虚拟惯量控制，频率控制效果不受限于风机的运行状态。该控制不仅能平抑频率波动，同时提高系统响应速度，避免风机转速恢复对系统的二次扰动。

3.6 储能输出功率及调频效果

本节以20%风机渗透率工况为例，通过控制器不断增加储能输出功率，记录系统频率的谷值用于观测频率响应效果。结果如下表所示，仿真曲线如图15所示。

表 储能功率-频率谷点表

Tab. ESS power and frequency valley value table

储能功率 /MW	30	80	120	130
系统频率谷点 /Hz	49.32	49.66	49.90	49.95

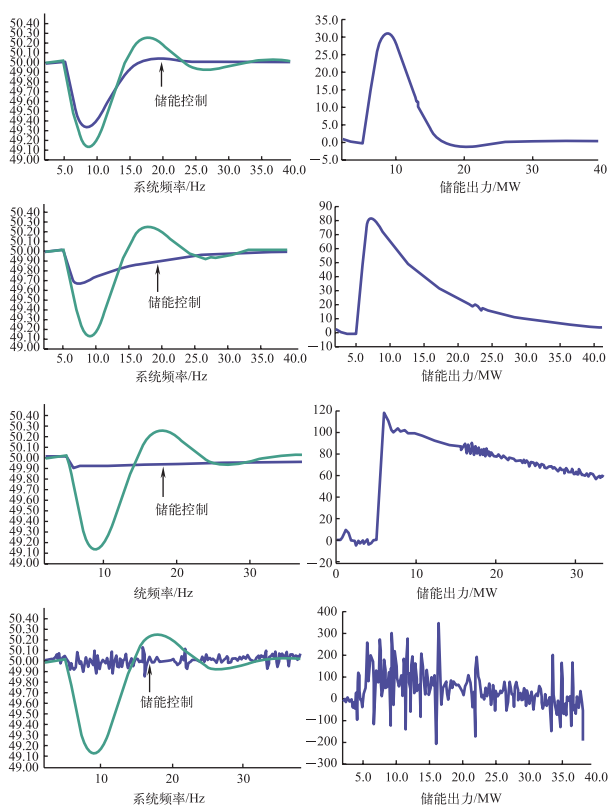


图 15 储能功率-频率谷点仿真曲线

Fig. 15 ESS power-frequency valley value simulation results

由仿真结果可得,通过增加储能容量,可更好地抑制频率波动。在工程中,可按照实际运行对频率的要求,综合考虑经济性优化配置储能容量。

4 结束语

为了使风机提供虚拟转动惯量辅助电网调频,本文提出了风机与风机-储能系统的虚拟转动惯量控制策略,并针对多种风电渗透率工况开展电磁仿真,对比了各控制方法的效果。仿真结果表明,仅采用风机虚拟惯量控制时,控制效果存在明显不足;增加储能后,不仅可以平抑频率波动,还可以提高系统的响应速度,避免频率的

二次下跌。本研究完善了大规模风电并网的控制运行体系,为新能源大量接入后电网的安全稳定运行提供了重要参考。**EA**

参考文献

- [1] 柳伟,顾伟.双馈风电机组一次调频技术研究[J].电气应用,2013,36(8):36-40.
- [2] 张怀宇,黄应强,张强,等.风电渗透率对接入电网频率调整特性的影响分析[J].电气应用,2018(10):17-23.
- [3] 任凯,张江滨,李华.考虑风电参与调频的区域电网频率控制[J].电气应用,2018(10):17-23.
- [4] 刘巨,姚伟,文劲宇,等.大规模风电参与系统频率调整的技术展望[J].电网技术,2014,38(3):638-646.
- [5] MIAO Lu, WEN Jinyu, XIE Hailian, et al. Coordinated control strategy of wind turbine generator and energy storage equipment for frequency support[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4): 2732-2742.
- [6] 刘巨,姚伟,文劲宇,等.一种基于储能技术的风电场虚拟惯量补偿策略[J].中国电机工程学报,2015,35(7):1596-1605.

作者简介



苗璐

苗璐(1989—),女,工学博士,研究方向为直流输电系统,新能源并网分析。

(收稿日期:2021-06-06)