

# 含风电孤立中压微电网静态电压稳定性分析及改善策略

赵卓立<sup>1,2</sup>, 杨 苹<sup>1,3,4</sup>, 蔡泽祥<sup>1</sup>, 周少雄<sup>3,4</sup>, Timothy C. Green<sup>2</sup>, 雷金勇<sup>5</sup>

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641; 2. 帝国理工学院, 英国 伦敦 SW7 2AZ;

3. 华南理工大学 风电控制与并网技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 511458;

4. 华南理工大学 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 511458;

5. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080)

**摘要:** 分析了孤立微电网中双馈异步风力发电机组(DFIG)的功率电压特性, 针对微电网不同运行方式约束, 为改善含 DFIG 微电网的静态电压稳定性, 提出了基于就地层储能稳定控制、DFIG 快速变桨控制的静态电压稳定增强控制策略。基于 PSCAD/EMTDC 建立了微电网系统和稳定控制策略模型, 研究结果表明, 在不同运行方式下风速扰动时, 提出的增强控制策略能有效增强微电网的静态电压稳定性, 确保微电网的安全稳定运行。

**关键词:** 微电网; 风电; 电压稳定; 双馈异步发电机; 储能; 运行方式

**中图分类号:** TM 712; TM 614

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.11.003

## 0 引言

可再生和绿色分布式发电系统渗透率的不断提高, 将促进发电方式、输配电方式和电能使用方式出现新的变革。作为实现智能电网中主动配电网的有效方式, 微电网有利于引入大量可再生能源发电, 减少太阳能、风能等强波动性/间歇性能源的接入对大电网造成冲击, 在中低压层面上有效解决分布式电源高渗透率运行时的问题, 同时降低电网脆弱性, 使电力系统更可靠、安全、清洁和经济<sup>[1-4]</sup>。当微电网由于外部电网故障或应用于偏远地区和海岛供电时, 需孤岛运行。孤立微电网是由分布式电源 DG(Distributed Generation)、储能装置、能量转换装置、相关负荷, 联合协调控制保护装置和智能调度系统组成的小型发电系统, 是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统<sup>[5-7]</sup>。

与定速异步风电机组相比, 双馈异步风力发电机组 DFIG(Doubly-Fed Induction Generator)能通过转子绕组的交流励磁控制来实现有功、无功功率的解耦控制, 改善风电机组的功率因数<sup>[8]</sup>。在孤立微电网中引入 DFIG, 能够提高微电网的电压和频率稳定

性<sup>[9-10]</sup>。与传统电网不同, 微电网系统惯性较小, 而 DFIG 受风速影响输出功率具有强间歇性、随机性和弱支撑性的特点, 其动态特性给微电网的稳定运行带来较大影响, 风电高渗透率将带来微电网中稳定性、可靠性和电能质量问题<sup>[11]</sup>。在扰动下, 高渗透率微电网表现出包含连续和离散事件驱动的更为频繁与复杂的混合动态特性<sup>[12]</sup>。DFIG 对微电网稳定性的影响和改善措施成为微电网研究面临的重要课题。

文献[9]研究通过引入 DFIG 改善微电网的动态特性, 建立微电网中 DFIG 的动态模型, 并提出增加额外的电压控制环和频率控制环, 以提高并网和计划/非计划孤岛切换稳定性; 然而, 该研究忽略考虑风速扰动下系统的动态表现。文献[13-15]较早考虑了风速波动对微电网稳定性的影响; 文献[13]在 DFIG 中通过引入旋转质量块和超级电容的方式实现虚拟惯量, 以提高风速波动情况下微电网的静态稳定性; 文献[14-15]分别引入超级电容和蓄电池储能控制策略以减缓由于风功率波动引起的微电网频率与电压波动。然而, 在风速、负荷以及储能系统荷电状态 SOC(State Of Charge)变化时, 实际上微电网运行方式安排和电源投运安排将发生改变, 目前这些文献提出的用于改善风速波动情况下微电网稳定性的控制策略均没有考虑微电网运行方式约束。因此, 考虑微电网运行方式约束的静态电压稳定机理还需进一步探讨。

与此同时, 微电网作为弱电网, 容量较小, 负荷特性对系统的稳定有不可忽视的影响, 负荷形式对微电网稳定性具有重要影响。目前研究微电网稳定性的论文中, 微电网中所有负荷都用恒定阻抗或恒定功率负荷仿真模拟<sup>[16-18]</sup>, 但在配电网负荷中, 大体上 60% 的负荷由直接连接感应电动机组成<sup>[19-20]</sup>, 因此

收稿日期: 2014-12-22; 修回日期: 2015-10-01

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2014AA-052001); 广东省科技计划项目(2012B040303005); 广州市南沙区科技计划项目(2013P005); 南方电网科学研究院科技项目(SEPRI-K143003); 国家留学基金管理委员会资助联合培养博士研究生项目(201406150017)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2014AA05-2001), Science and Technology Planning Project of Guangdong Province(2012B040303005), Science and Technology Planning Project of Nansha District, Guangdong Province(2013P005), Science and Technology Project of China Southern Power Grid Electric Power Research Institute(SEPRI-K143003) and Joint Ph.D. Scholarship of China Scholarship Council(201406150017)

使用恒定阻抗或恒定功率负荷进行仿真会导致仿真结果不具备可信性。

针对上述问题,本文以主从控制模式微电网为研究对象,在研究微电网中双馈风电机组的功率电压特性的基础上,考虑微电网运行方式约束,提出基于就地储能稳定控制、DFIG 快速变桨控制的静态电压稳定增强控制策略,以改善风速扰动下微电网的电压稳定性。在 PSCAD/EMTDC 中建立了中压海岛微电网系统及微电网稳定控制策略模型,微电网系统包含柴油发电机、双馈风电机组、储能系统以及由静态负荷和动态负荷组成的综合负荷模型,研究结果验证了所提静态电压稳定增强控制策略的有效性。

## 1 研究系统描述

研究系统为珠海万山海岛新能源微电网示范项目东澳岛智能微电网。东澳岛微电网为 10 kV 中压海岛微电网,系统规划单线图如图 1 所示。系统由 10 kV 等级的 3 条辐射状配电馈线组成,并通过静态开关 SS(Static Switch)、变压器后经 35 kV 海底电缆

连接至桂山海上电压站、大万山岛微电网以及桂山岛微电网。馈线 2 与馈线 3 接有感应电动机动态负荷、静态负荷 1 与静态负荷 2。系统包括 3 个分布式发电单元:馈线 1 上的柴油发电机组(1.275 MV·A)、馈线 3 上的 DFIG(0.9 MV·A)和储能系统(0.8 MV·A)。其中,柴油发电机组装备有固态电子调速器和数字式自动励磁调整装置。储能系统配置 2 台 500 kW 变流器,直流侧分别接一组 2000 A·h 阀控式铅酸蓄电池组(电池组出口电压 600 V),交流侧经 1 台 380 V/10 kV 升压变压器接入 10 kV 母线。东澳岛微电网中远期主要考虑以海岛联网为主的孤岛运行方式,为海岛用户供电。

## 2 微电网中双馈风电机组运行特性分析

DFIG 接入微电网的等效电路如图 2 所示,所有转子侧分量已折算到定子侧,其中  $R_s$  为定子电阻,  $R_r$  为转子电阻,  $X_{ls}$  为定子漏抗,  $X_{lr}$  为转子漏抗,  $X_m$  为定转子之间互抗,  $Z_{eq}$  为转子侧变流器的等效阻抗,  $s$  为发电机转差率,  $E$  与  $U$  分别对应微电网 10 kV 母

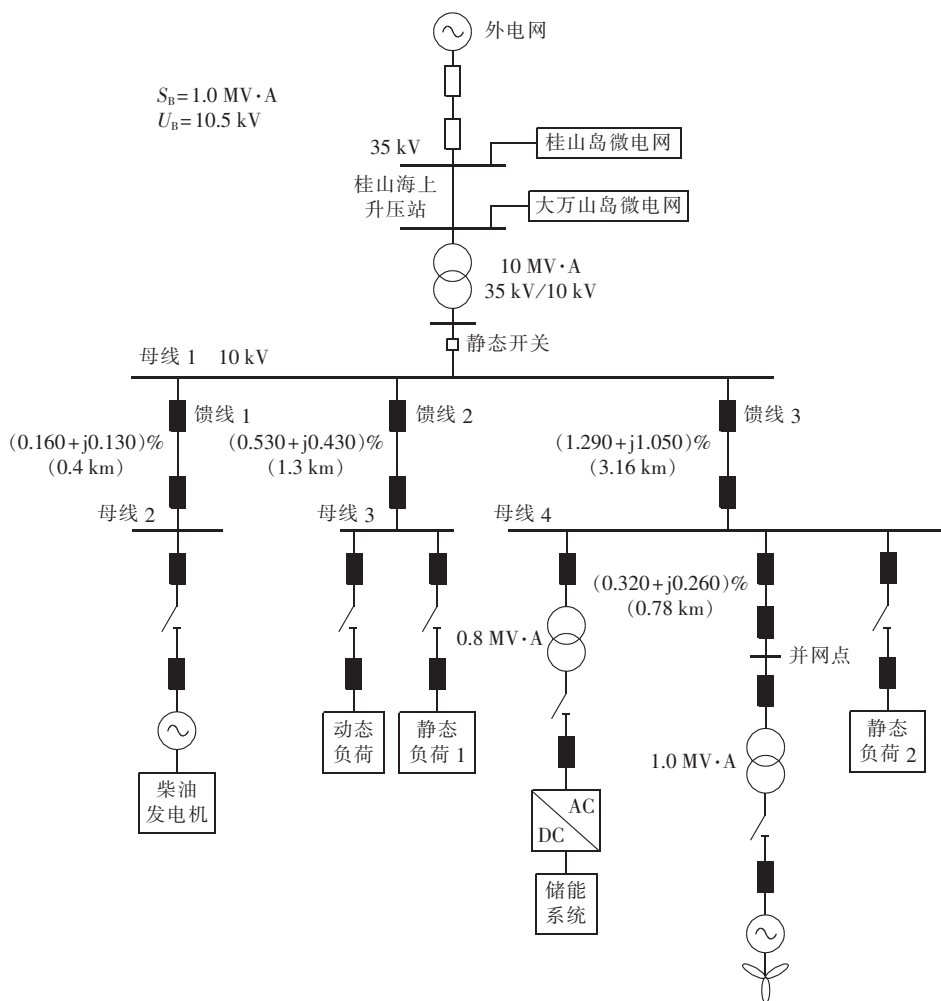


图 1 东澳岛中压海岛微电网系统单线图

Fig.1 Single-line diagram of Dongao Island medium-voltage microgrid

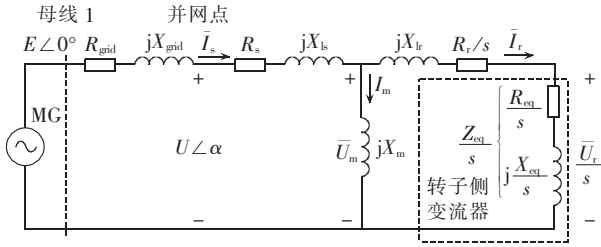


图 2 DFIG 接入微电网的等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagram of microgrid-connected DFIG

线 1 以及风机并网点电压。DFIG 通过等值线路 (阻抗  $Z_{\text{grid}} = R_{\text{grid}} + jX_{\text{grid}}$ ) 连接到微电网母线 1。

风速扰动下,DFIG 注入微电网系统功率变化时,会使线路上的电流产生  $\Delta I$  的变化,在风机并网点的电压变化值为<sup>[21-22]</sup>:

$$\begin{aligned} \Delta U &= (R_{\text{grid}} + jX_{\text{grid}})(\Delta I_p + j\Delta I_q) = \\ &|Z_{\text{grid}}|(\cos\varphi + j\sin\varphi)|\Delta I|(\cos\theta + j\sin\theta) = \\ &\frac{E\Delta S_n}{S_k}[\cos(\varphi + \theta) + j\sin(\varphi + \theta)] \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $\Delta S_n$  为 DFIG 的注入功率变化;  $S_k$  为并网点短路容量;  $\varphi$  为从 DFIG 接入点看入的电网阻抗角;  $\theta$  为 DFIG 的功率因数角。

将  $\Delta U$  分解为纵分量  $\Delta U_R$  和横分量  $\Delta U_X$ , 并进行归一化:

$$\begin{cases} \frac{\Delta U_R}{E} = \frac{1}{|Z_{\text{grid}}|S_k}(\Delta PR_{\text{grid}} - \Delta QX_{\text{grid}}) \\ \frac{\Delta U_X}{E} = \frac{1}{|Z_{\text{grid}}|S_k}(\Delta PX_{\text{grid}} + \Delta QR_{\text{grid}}) \end{cases} \quad (2)$$

一般地,电压变化量的横分量  $\Delta U_X$  产生电压相角差,在实际分析中,往往可以忽略;而电压变化量的幅值主要由纵分量  $\Delta U_R$  决定。 $\Delta P$  与  $\Delta Q$  之间的关系取决于 DFIG 运行功率因数。

传统低压微电网中线路参数  $R_{\text{grid}} \gg X_{\text{grid}}$ , 因此可忽略由于无功功率  $\Delta Q$  产生的电压降落变化,认为系统节点电压主要取决于有功潮流。而 10 kV 中压微电网中线路参数  $R_{\text{grid}} \approx X_{\text{grid}}$ , 呈阻感混合特性,中压微电网将出现强耦合情况,因此系统节点电压同时受有功潮流与无功潮流影响。由式(2)可见,DFIG 在风速扰动下的电压稳定性与接入点的短路容量的大小、DFIG 与微电网系统联络线的阻抗参数以及 DFIG 的功率因数大小有密切的关系。

### 3 微电网静态电压稳定增强控制策略

#### 3.1 小扰动电压稳定增强控制策略

由于微电网中高压柴油发电机电压稳定时间为 4 s,电压调节速度相对较慢;同时东澳岛微电网柴油发电机与 DFIG 地理位置相距 4.34 km,DFIG 并网点远端的柴油发电机无法对并网点电压进行快速调

整。因此 DFIG 在风速扰动下导致输出功率的快速波动将降低微电网小扰动电压稳定性,严重时将引起微电网电压失稳。

由式(2)可知,对于单位功率因数运行的 DFIG,  $\Delta Q = 0$ ;若令  $\Delta P = 0$ ,可使  $\Delta U \approx 0$ ;因此,风速扰动过程中,通过控制储能系统输出或 DFIG 桨距角减小  $\Delta P$ ,可有效抑制节点电压波动  $\Delta U$ ,增强微电网小扰动电压稳定性。

针对微电网不同运行方式约束,设计小扰动电压稳定增强控制策略。根据东澳岛实测风速数据,双馈风力发电机组典型日出力特性曲线如图 3 所示;统计数据表明,风电出力大于 70% 的情况多集中于 20:00 至次日 08:00。考虑东澳岛微电网电源构成及出力特性,采用的运行方式安排与小扰动电压稳定增强控制策略如表 1 所示。

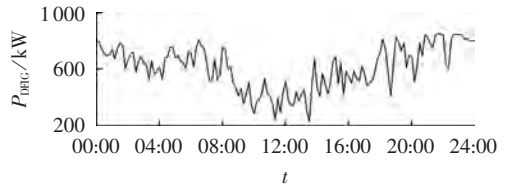


图 3 东澳岛微电网 DFIG 典型日出力特性曲线

Fig.3 Typical daily output curve of DFIG of Dongao Island microgrid

表 1 运行方式安排与小扰动电压稳定增强控制策略  
Table 1 Operating modes and enhanced voltage stability control strategy under small disturbance

电源	运行方式		
	大方式一	小方式一	小方式二
主控电源	柴油发电机组	柴油发电机组	柴油发电机组
柴油发电机组	正常运行区间 (20%~100%)	正常运行区间 (20%~100%)	低载运行 (<20%)
DFIG	风小	风大	风大
储能系统	放电	充电	充满停运
负荷	动态 负荷	2×600 hp 感应电机	600 hp 感应电机
	静态 负荷	0.56 MW	0.38 MW
小扰动电压稳定 增强控制策略	储能平滑风电 功率波动	储能平滑风电 功率波动	快速变桨

大方式一与小方式一下,储能系统分别处于放电、充电状态平滑风电功率波动,储能有功功率给定值为设定的有功参考值与 DFIG 输出的有功功率之差 ( $\Delta P = 0$ )。小方式二(通常出现在夜晚)下通过快速变桨降低  $\Delta P$ ,可减小风电功率波动;同时由于微电网负荷较小,柴油发电机组在风速扰动下容易偏离正常运行区间,因此该策略可避免风机频繁启停以及柴油发电机组长期低载运行。

#### 3.2 就地层储能稳定控制

储能系统配置在 DFIG 并网点附近,与 DFIG 联合运行。图 4 所示为储能系统的结构及对应的控制

策略,蓄电池组通过三相并网逆变器和  $LC$  滤波器并入 DFIG 附近母线 4,储能采用有功电压(PV)控制策略,有功功率控制器参与平抑 DFIG 由于风速变化而产生的功率波动;电压控制器作用是在微电网电压波动过程中通过控制储能系统提供快速无功支撑,参与微电网系统静态电压稳定控制,以改善微电网系统小干扰电压稳定性。如图 4 所示, $P_{DFIG}$  为母线 4 风机出口功率, $U_{ms}$  为母线 4 的瞬时电压有效值; $C_u$ 、 $C_p$ 、 $C_q$ 、 $C_{id}$  和  $C_{iq}$  为相应的比例积分控制器,控制器参数见表 2。

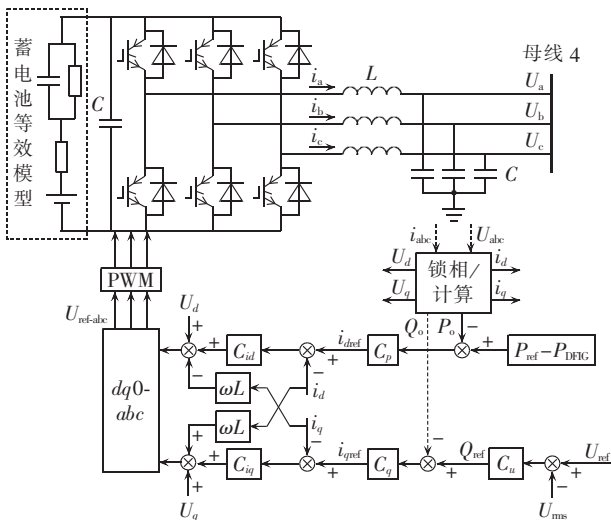


图 4 储能系统的结构及控制策略

Fig.4 Structure and control strategy of energy-storage system

表 2 增强控制策略控制器参数

Table 2 Controller parameters of enhanced control strategy

控制器	参数	取值	控制器	参数	取值
$C_u$	$K_{pu}$	0.15	$C_{id}$	$K_{pid}$	11
	$K_{iu}$	10		$K_{iid}$	400
$C_p$	$K_{pp}$	1.5	$C_{iq}$	$K_{piq}$	11
	$K_{ip}$	50		$K_{iiq}$	400
$C_q$	$K_{pq}$	1.5	$C_\beta$	$K_{p\beta}$	30
	$K_{iq}$	50		$K_{i\beta}$	540

有功功率控制器以设定的有功参考值与 DFIG 输出的有功功率之差  $P_{ref}-P_{DFIG}$  作为控制器的输入参考信号,从微电网系统侧看,风速波动时储能系统与 DFIG 共同向微电网注入功率  $P_{ref}$  保持恒定。给定额定电压参考值  $U_{ref}$  与  $U_{ms}$  之差反馈到电压控制器,生成储能系统响应的无功参考值  $Q_{ref}$ 。 $P_{ref}$  和  $Q_{ref}$  经过内环电流控制器生成储能变流器 PWM 驱动信号,从而调整储能系统输出有功和无功给定的参考值。通过平滑 DFIG 的有功功率波动和参与扰动过程中的电压调整,从而保持微电网系统电压稳定性。

### 3.3 就地层 DFIG 快速变桨控制

由 3.1 节可知,在风速扰动过程中,小方式二下

DFIG 快速变桨控制可有效提高微电网静态电压稳定性,其控制策略如图 5 所示。

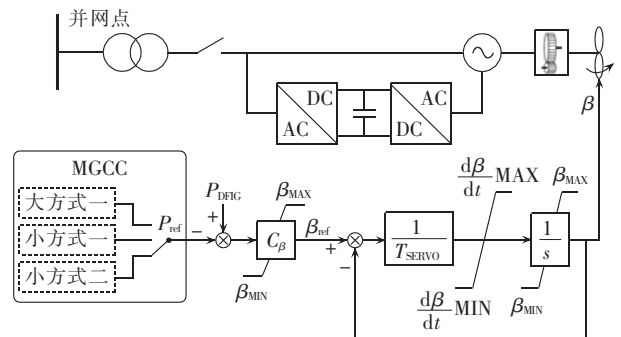


图 5 DFIG 快速变桨控制

Fig.5 Fast pitch-angle control of DFIG

微电网中央控制器(MGCC)根据风速、负荷以及储能系统荷电状态安排运行方式。在大方式一与小方式一下,当风速小于额定风速时,机械功率  $P_M$  小于额定机械功率  $P_{Mref}$ ,DFIG 运行在最大风能追踪状态,桨距角参考值  $\beta_{ref}=0^\circ$ ;当风速大于额定风速时,DFIG 桨距角控制将功率保持在额定值。在小方式二下,机械功率  $P_M$  大于额定机械功率  $P_{Mref}$ ,DFIG 响应 MGCC 有功调度信号  $P_{ref}$ , $\beta_{ref}>0^\circ$ 。为反映真实的变桨控制系统伺服机构的动态响应特性,桨距角控制系统模型中采用伺服时间常数  $T_{SERVO}$ ,桨距角调节的限值  $\beta_{MAX}$ 、 $\beta_{MIN}$  及桨距角变化速率限值  $\frac{d\beta}{dt} MAX$ 、 $\frac{d\beta}{dt} MIN$

描述。考虑实际变桨伺服控制系统的限制,快速变桨调节器的最大执行速度设为  $\pm 10^\circ/s$ ,桨距角的变化范围为  $0^\circ \sim 25^\circ$ 。

## 4 系统仿真及算例分析

### 4.1 研究系统建模

在 PSCAD/EMTDC 中建立了图 1 所示东澳岛微电网系统和稳定控制策略仿真模型,以验证微电网电压协同控制策略对于改善电压稳定性的有效性。其中,高压柴油发电机组模型由调速器、励磁调节器及原动机模型组成,同步发电机采用 6 阶模型;储能系统由蓄电池模型与双向变流器组成,蓄电池模型采用考虑动态电容和时变内阻的戴维南一阶模型等效,可模拟充放电动态过程;DFIG 包含直流 Crowbar 模块。每条馈线用三相架空线或电缆表示,等效为  $RL$  集总参数模型。仿真系统中采用的负荷模型为静态负荷并联感应电动机动态负荷的综合负荷模型,综合负荷模型含 40% 静态负荷和 60% 动态负荷。微电网系统具体参数如下。

柴油发电机组技术参数为:额定功率为 1020 kW/1275 kV·A,备用功率为 1100 kW/1375 kV·A,额定电压为 10.5 kV,2.0 倍额定功率过载运行时间为

3 min, 稳态电压调整率为  $\pm 1\%$ , 瞬态电压调整率为  $-15\% \sim 20\%$ , 电压稳定时间为 4 s, 直轴同步电抗  $X_d = 1.758$  p.u., 直轴暂态电抗  $X'_d = 0.213$  p.u., 直轴次暂态电抗  $X''_d = 0.139$  p.u., 负序电抗  $X_2 = 0.15$  p.u., 零序电抗  $X_0 = 0.051$  p.u.。

DFIG 技术参数如下: 额定功率为 800 kW/900 kV·A, 定子线电压额定值为 0.69 kV, 定子绕组电阻  $R_s = 0.0054$  p.u., 定子漏感  $L_{ls} = 0.1$  p.u., 转子绕组电阻  $R_r = 0.00607$  p.u., 转子漏感  $L_{lr} = 0.11$  p.u., 励磁电感  $L_m = 4.5$  p.u.。

综合负荷技术参数如下: 静态负荷 1 为 0.2 MW; 静态负荷 2 为 0.36 MW; 动态负荷(等值感应电动机)的额定功率为 600 hp(447.4 kV·A), 电压等级为 6 kV, 数量为 2 台。

#### 4.2 风速扰动仿真分析

(1) 算例 1: 大方式一下储能系统平滑风电功率波动改善小扰动电压稳定性。设定稳态风速为 12 m/s, 从 1.5 s 开始发生连续阵风扰动, 风速下降至 6.5 m/s 与 5.5 m/s。图 6 描述了储能系统参与控制/无储能 2 种情况下微电源有功响应与母线 4 电压特性(均为标么值)。

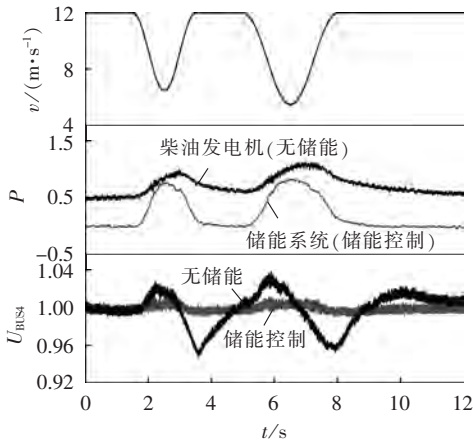


图 6 阵风扰动下微电源有功响应与母线 4 电压特性(储能控制/无储能)

Fig.6 Active power response of microsource and voltage characteristic of BUS 4 under gust wind disturbance (with/without energy-storage control)

由图 6 可知, 阵风扰动过程中, 无储能补偿时柴油发电机组调节速度较慢, 响应滞后风速波动约 500 ms, 微电网母线 4 电压出现较大波动, 波动幅值达 8.9%, 不满足 IEC61000-3-7 国际标准对中压电网电压波动幅值技术要求。当储能参与控制时, 储能系统毫秒级响应速度能够快速平滑 DFIG 功率波动, 并网点电压波动得到良好的抑制, 电压波动幅值降低至 1.6%, 扰动后电压稳定时间从大于 5 s 减小为 0.85 s。从仿真结果可见, 在大方式一下储能系统有效地改善了微电网小扰动电压稳定性。

由于大方式一与小方式一下储能均用于平滑风电功率波动, 放电与充电外特性相似, 故仅选择大方式一分析。

(2) 算例 2: 小方式二下快速变桨控制改善小扰动电压稳定性。设定初始风速为 9.5 m/s, 从 3 s 开始受渐变风扰动, 风速上升为 12 m/s。图 7 描述了 DFIG 桨距角参与控制/无桨距角控制 2 种情况下微电源有功响应与母线 4 电压特性(均为标么值)。

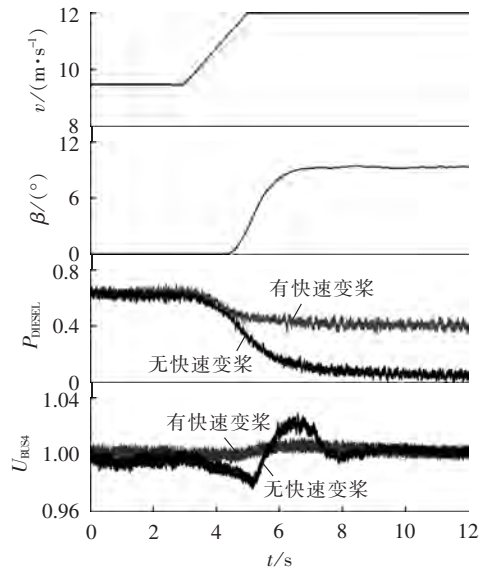


图 7 渐变风扰动下微电源有功响应与母线 4 电压特性(快速变桨控制/无变桨)

Fig.7 Active power response of microsource and voltage characteristic of BUS 4 under ramp wind disturbance (with/without pitch-angle control)

由图 7 可知, DFIG 快速变桨控制有效地抑制了母线 4 电压波动, 使电压波动从 5.25% 降低至 1.8%, 扰动后电压稳定时间从 6.2 s 减至 2.5 s。此外由表 1 知, 小方式二下微电网负荷较小, 储能系统由于蓄电池充满处于停运状态。DFIG 快速变桨控制增强小扰动电压稳定性的同时, 可减少柴油发电机长期低载运行以及风机频繁启停对微电源运行寿命的影响。

## 5 结论

a. 本文首先分析了中压孤岛微电网中 DFIG 的功率电压特性, 分析表明中压微电网系统节点电压同时受有功潮流与无功潮流影响; 利用 DFIG 可单位功率因数运行的优势, 通过控制储能系统输出或 DFIG 桨距角平抑风电功率波动, 可有效抑制并网点电压波动。

b. 针对微电网不同运行方式约束, 为改善含 DFIG 微电网静态电压稳定性, 提出了基于就地储能稳定控制、DFIG 快速变桨控制的静态电压稳定增强控制策略。在 PSCAD/EMTDC 中建立了东澳岛微电网系统和稳定控制策略仿真模型, 仿真验证了稳定控制策

略对于改善电压稳定性的有效性。研究表明,小扰动电压稳定增强控制策略能有效抑制阵风以及渐变风扰动下微电网母线和风机并网点电压波动,补偿远端柴油发电机慢动态电压调节能力;小方式二下DFIG快速变桨控制同时可减少柴油发电机长期低载运行以及风机频繁启停。本文提出的电压稳定控制策略有利于微电网的安全稳定运行。

c. 本文提出的微电网电压协同控制策略可为多能互补微电网稳定控制策略的研究奠定一定的基础。

### 致 谢

本文中微电网建模与实验方案设计是在南方电网科学研究院和广东省绿色能源技术重点实验室等工作人员共同参与国家重点智能电网工程——“珠海万山海岛新能源微电网示范项目”下合作完成的,在此致以衷心的感谢。

### 参考文献:

- [1] LASSETER R H, PAIGI P. Microgrid: a conceptual solution[C]// Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual. Aachen, Germany; IEEE, 2004: 4285-4290.
- [2] GUERRERO J M, LOH P C, CHANDORKAR M, et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids, part I: decentralized and hierarchical control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1254-1262.
- [3] 吴雄, 王秀丽, 刘世民, 等. 微电网能量管理系统研究综述[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 7-12.  
WU Xiong, WANG Xiuli, LIU Shimin, et al. Summary of research on microgrid energy management system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 7-12.
- [4] 苗铁群, 江全元, 曹一家. 考虑电动汽车随机接入的微网优化调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 1-7.  
MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Optimal microgrid dispatch considering stochastic integration of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 1-7.
- [5] 杨占刚, 徐玉磊, 王成山, 等. 光储微电网运行特性及影响因素分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 15-20.  
YANG Zhangang, XU Yulei, WANG Chengshan, et al. Operating characteristics and influencing factors of photovoltaic-storage microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 15-20.
- [6] 马艺玮, 杨苹, 王月武, 等. 微电网典型特征及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 168-175.  
MA Yiwei, YANG Ping, WANG Yuewu, et al. Typical characteristics and key technologies of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 168-175.
- [7] 石庆均, 江全元. 包含蓄电池储能的微网实时能量优化调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 76-82.  
SHI Qingjun, JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch for microgrid with battery storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 76-82.
- [8] 迟永宁, 王伟胜, 戴慧珠. 改善基于双馈感应发电机的并网风电场暂态电压稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 25-31.  
CHI Yongning, WANG Weisheng, DAI Huizhu. Study on transient voltage stability enhancement of grid-connected wind farm with doubly fed induction generator installations[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(25): 25-31.
- [9] SHAHABI M, HAGHIFAM M R, MOHAMADIAN M, et al. Micro-grid dynamic performance improvement using a doubly fed induction wind generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(1): 137-145.
- [10] 李国庆, 王鹤, 李鸿鹏. 微电网中双馈感应风力发电系统控制方法研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 1-7.  
LI Guoqing, WANG He, LI Hongpeng. Control strategy for DFIG-based wind farm in microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 1-7.
- [11] MAJUMDER R. Some aspects of stability in microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3243-3252.
- [12] DOU C, LIU B. Hierarchical management and control based on MAS for distribution grid via intelligent mode switching[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 54: 352-366.
- [13] ARANI M F M, EL-SAADANY E F. Implementing virtual inertia in DFIG-based wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1373-1384.
- [14] KAMEL R M, CHAOUACHI A, NAGASAKA K. Three control strategies to improve the microgrid transient dynamic response during isolated mode: a comparative study[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1314-1322.
- [15] 邓卫, 唐西胜, 齐智平. 异步风力发电机对微网稳定性的影响与对策[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 32-38.  
DENG Wei, TANG Xisheng, QI Zhiping. Impact of asynchronous wind turbine on microgrid stability and the solution[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 32-38.
- [16] MAJUMDER R, CHAUDHURI B, GHOSH A, et al. Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 796-808.
- [17] TANG Xisheng, DENG Wei, QI Zhiping. Investigation of the dynamic stability of microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 698-706.
- [18] 李玉梅, 查晓明, 刘飞. 含有多个恒功率负荷的多源直流微电网振荡抑制研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 40-46.  
LI Yumei, ZHA Xiaoming, LIU Fei. Oscillation suppression of multi-source DC microgrid with multiple constant-power loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 40-46.
- [19] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994: 272.
- [20] KASEM ALABOUDY A H, ZEINELDIN H H, KIRTLEY J L. Microgrid stability characterization subsequent to fault-triggered islanding incidents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 658-669.
- [21] TAYLOR C W. Power system voltage stability[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994: 14-18.
- [22] 裴玮, 盛鸥, 孔力, 等. 分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 152-157.  
PEI Wei, SHENG Kun, KONG Li, et al. Impact and improvement of distributed generation on distribution network voltage quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 152-157.

## 作者简介:



赵卓立

赵卓立(1988—),男,广东江门人,博士研究生,主要研究方向为微电网协调控制与稳定性分析、新能源发电并网与控制技术(E-mail:zhuoliscut@gmail.com);

杨 芊(1967—),女,广西钦州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为新能源发电并网与控制技术、分布式发电与微电网

技术、复杂系统建模与分析(E-mail:eppyang@scut.edu.cn);

蔡泽祥(1960—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、电力系统继电保护(E-mail:epzxc@scut.edu.cn);

周少雄(1985—),男,福建莆田人,工程师,硕士,主要研究方向为新能源电力系统中建模与控制技术;

Timothy C. Green(1963—),男,英国人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为智能电网控制与稳定性分析。

## Analysis and improvement of steady-state voltage stability for isolated medium-voltage microgrid with wind power

ZHAO Zhuoli<sup>1,2</sup>, YANG Ping<sup>1,3,4</sup>, CAI Zexiang<sup>1</sup>, ZHOU Shaoxiong<sup>3,4</sup>, Timothy C. Green<sup>2</sup>, LEI Jinyong<sup>5</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. Imperial College London, London SW7 2AZ, U.K.; 3. National-Local Joint Engineering Laboratory for Wind Power Control and Integration Technology, South China University of Technology, Guangzhou 511458, China; 4. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, South China University of Technology, Guangzhou 511458, China;

5. China Southern Power Grid Electric Power Research Institute, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** The power-voltage characteristics of DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) with wind turbine in the isolated microgrid are analyzed and a strategy based on the local energy-storage stability control and fast pitch-angle control is proposed according to the constraints of different operating modes of microgrid with DFIG to enhance its steady-state voltage stability control. A model of microgrid system with stability control strategy is built based on PSCAD/EMTDC and the results of research indicate that, the proposed strategy enhances effectively the steady-state voltage stability of microgrid under the wind disturbances in different operating modes to guarantee its safe and stable operation.

**Key words:** microgrid; wind power; voltage stability; doubly-fed induction generator; energy storage; operating mode

(上接第 7 页 continued from page 7)

## Gradual deterioration probability analysis based on temperature characteristic parameters for critical components of wind turbine generator system

LI Hui<sup>1</sup>, HU Yaogang<sup>1</sup>, LI Yang<sup>1</sup>, YANG Dong<sup>1</sup>, OUYANG Haili<sup>2</sup>, LAN Yongsen<sup>2</sup>, TANG Xianhu<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. CSIC (Chongqing) Haizhuang Wind Power Equipment Co., Ltd., Chongqing 401122, China; 3. Chongqing KK-QIANWEI Wind Power Equipment Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

**Abstract:** A method of gradual deterioration probability analysis based on the temperature characteristic parameters is proposed for the critical components of WTGS (Wind Turbine Generator System) to grasp their deterioration level and tendency. Since the fixed threshold may not be used to accurately determine the degradation degree, the concept of data fitting and turbine grouping based on the temperature characteristic parameters and rotation speeds of the critical components is proposed to set the dynamic thresholds for the upper and lower limits of degradation degree. In order to include the effects of operating condition and duration on the degradation degree, the nonparametric kernel density estimation method is applied to build the probability density function of degradation degree for the critical components and a method of gradual deterioration probability analysis is presented for different monitoring cycles. With the rear bearing of a wind-turbine generator in an actual wind farm as an example, the proposed dynamic threshold method and probability analysis method are verified based on the historical monitoring data of its gradual deterioration. Compared with the fixed threshold method, the proposed dynamic threshold method can more accurately determine the degradation degree of components and more effectively analyze the deterioration tendency of critical components.

**Key words:** wind turbines; condition monitoring; dynamic threshold; turbine grouping; probability density; deterioration tendency; wind power