

DFIG 在微电网中的电压控制策略与小干扰电压稳定性分析研究^{*}

赵晶晶, 左亮亮, 赵铃光, 黄诗扬
(上海电力学院 电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 为增强微电网小干扰电压稳定性, 针对含双馈感应风力发电机 (DFIG) 的风光柴微电网, DFIG 无功控制采用 $V-Q$ 下垂控制并引入积分逻辑环节, 同时计算变风速情况下 DFIG 有功功率对应的无功功率极限, 对 $V-Q$ 下垂控制与积分环节进行限幅。通过小干扰分析法找出了一对反映微电网电压响应特性的典型特征值, 分析 DFIG 无功下垂系数取不同值时对典型特征值分布轨迹的影响。为了解决无功下垂系数取较大和较小值时带来的问题, 经过参数改进后既促进了 DFIG 参与微电网调压的效果, 又使微电网拥有更好的小干扰电压稳定性。最后在 DIgSILENT/Power Factory 仿真软件中搭建微电网模型, 通过动态时域仿真验证了所提策略和方法对促进微电网调压以及提高微电网小干扰电压稳定性的有效性。

关键词: 微电网; 双馈感应风力发电机; 电压控制; 特征值; 小干扰电压稳定性

中图分类号: TM 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)03-0022-08

Study on Voltage Control Strategy of DFIG in Microgrid and Small-Disturbance Voltage Stability Analysis^{*}

ZHAO Jingjing, ZUO Liangliang, ZHAO Lingguang, HUANG Shiyang
(School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In order to enhance the small-disturbance voltage stability of wind/photovoltaic/diesel microgrid including doubly fed induction generator (DFIG), DFIG reactive power control uses $V-Q$ droop control and the integral logic loop. The reactive power limit corresponding to the DFIG active power in the case of variable wind speed was calculated, so that the integral logic loop and the $V-Q$ droop control were limited. The typical eigenvalues reflecting the voltage response characteristic of the microgrid were found by the small-signal analysis method. The influence on the typical eigenvalues distribution when adopting different values of the DFIG reactive power droop coefficient was analyzed. In order to solve the problems caused by large and small values of reactive droop coefficient, after parameter improvement, the voltage regulation effect of DFIG was promoted and the microgrid has better small-disturbance voltage stability. The microgrid model using the software DIgSILENT/PowerFactory was established, and the effectiveness of the proposed strategy and method was verified by the dynamic time domain simulation.

Key words: microgrid; doubly fed induction generator (DFIG); voltage control; eigenvalue; small-disturbance voltage stability

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51207087); 上海绿色能源并网工程技术研究中心资助项目(13DZ2251900); “电气工程”上海市Ⅱ类高原学科

作者简介: 赵晶晶(1980—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为分布式发电与微电网技术、风力发电无功电压控制、配电网无功优化。

左亮亮(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电无功电压控制、分布式发电与微电网技术。

赵铃光(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电与微电网技术、微电网有功频率控制。

0 引言

随着国家经济发展,近几年逐渐加大了对海岛和偏远山区的开发力度。这些地区较为可行的电力供应解决方案是以新能源开发为核心,构建独立型微电网^[1]。微电网在并网时电压由外部大电网支撑,在孤岛运行时只能由内部分布式电源调节控制,因此微电源在微电网中的电压控制研究受到关注^[2-4]。

在微电网中,为最大效率利用可再生能源,风力发电和光伏发电通常运行在最大风能和最大光能追踪模式。为了在负荷扰动时快速响应电压的变化,在柴油发电机的自动调压器调节之外,还需要各发电单元的协调作用,共同维持微电网电压稳定。目前双馈感应风力发电机(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)由于其转速调节范围宽,运行灵活,有功、无功解耦独立控制,为其参与微电网调频调压提供了技术支持,逐渐成为兆瓦级风机中主流机型。DFIG 可以利用转子中储存的旋转动能参与系统调频。如今对 DFIG 有功控制部分的研究主要提出了虚拟惯量控制、下垂控制、减载控制等方式^[5-10]。

对于 DFIG 的无功控制研究方面,因为 DFIG 通常运行在额定风速以下,有功功率没有达到额定值,所以拥有一定的无功容量。文献[11]指出了 DFIG 机组的无功功率由定子侧和网侧换流器发出或吸收的无功功率组成。文献[12]推导出 DFIG 机组定子侧无功功率极限和网侧无功功率极限的关系式,同时分析得出 DFIG 机组定子侧无功功率极限主要由转子侧变流器电流最大值约束和静态稳定裕度约束共同决定,而定子电流最大值约束对无功功率极限的约束最弱。文献[13]以 DFIG 机组等效电路为基础,分析了机组定子和网侧换流器无功调节的机理,两者调整相同的无功功率,最终稳态效果基本等效,但是调整过程不同,网侧换流器无功调整会引起功率的波动,故障过程中不利于机组的稳定控制及系统安全,从而确定了无功调用的优先级,定子高于网侧换流器。文献[14]提出在风机传统 $V-Q$ 下垂控制中加入 $P-Q$ 下垂控制环节,以此抑制变风速下风机有功输出变化引起的电压波动问题。文献[15]研究了一个考虑预测误差的电压控制策略,

但是误差还是无法避免。文献[16]为充分获取双馈风机的无功发生能力,提出了实时无功功率极限的变系数 $Q-V$ 下垂控制,但变下垂系数容易造成各微源间的无功功率分配问题,而且各节点电压会出现波动。

此外,对于实际电力系统,在运行中会不断受到各种小干扰,保持小干扰电压稳定已是系统运行的必要条件^[17]。小干扰电压稳定是指电力系统受到诸如负荷增加等小扰动后,系统所有母线维持稳定电压的能力^[18]。小干扰分析法是小干扰电压稳定的常用分析方法,是利用李雅普诺夫一次近似法分析电力系统静态稳定性,根据描述受扰运动的线性化微分方程组的特征方程式的根的性质来判断未受扰运动是否稳定的方法。文献[19]得出汽轮发电机组的励磁系统增益环节对小干扰电压稳定的影响积极而又显著;文献[20]使用小干扰分析法分析了风电机组通过有功控制参与系统调频时的频率稳定性,确定了风电机组有功控制系统中对特征值分布影响较大的控制环节的参数,并改进了该环节的参数。文献[21]利用时域非线性动态模拟的方法,对含有感应发电机的配电网的小干扰电压稳定性进行了研究。但都未对有风电机组参与调压的孤岛微电网进行小干扰电压稳定性研究。

本文在文献[5]中微电网的结构基础上,通过 DIgSILENT/Power Factory 仿真软件搭建了风光柴中压微电网模型,针对孤岛运行模式下微电网发生负荷扰动时的电压控制要求和稳定性,建立了参与电压控制的微电源及其电压控制环节的模型和微电网线性化小干扰分析模型。为了最大化利用太阳能,光伏电源按恒功率($P-Q$)控制模式运行;柴油发电机配备调速器和自动电压调节器;DFIG 无功控制采用 $V-Q$ 下垂控制,且考虑到 DFIG 变风速下其有功输出变化引起的风机出口端电压的波动,在 $V-Q$ 下垂控制中引入积分逻辑环节,同时计算变风速情况下 DFIG 有功功率对应的无功功率极限,对 $V-Q$ 下垂控制与积分环节进行限幅。通过小干扰分析法找出了一对反映微电网电压响应特性的典型特征值,分析 DFIG 无功下垂系数取不同值时对典型特征值分布轨迹的影响,针对 DFIG 无功下垂系数较大时电压稳态偏差略有增大,而下垂系数过小时会导致电压跌

落的问题,经过参数改进后既提高了 DFIG 参与微电网调压的效果,又使微电网拥有更好的小干扰电压稳定性。本文提出的策略和分析方法对促进 DFIG 参与微电网调压的效果,改善微电网小干扰电压稳定具有重要意义。

1 微电网系统的建模

1.1 微电源配置

本文在 DigSILENT/Power Factory 仿真软件中搭建了如图 1 所示孤岛模式风光柴中压微电网模型。微电网的主要配置如表 1 所示。

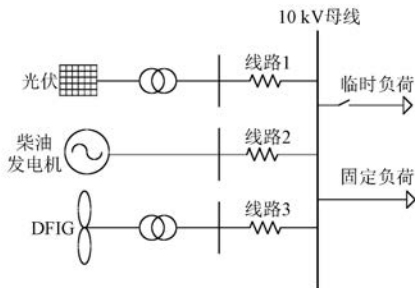


图 1 微电网结构示意图

表 1 微电网配置

名称	参数
光伏电源	DC-AC 变流器容量 3 MVA, 最大输出功率 2 MW, 额定电压 0.4 kV
柴油发电机	额定输出功率 16 MW, 功率因数 0.8, 额定线电压 10 kV
双馈感应发电机 (DFIG)	最大输出功率 5 MW, 额定电压 0.69/1.15/3.3 kV
固定负荷	14 MW
临时负荷	1 MW+1.5 Mvar

光伏微电源模型由恒压源和 PWM 变流器组成,经变压器接入微电网 10 kV 母线。柴油发电机采用同步发电机,经输电线路直接接入 10 kV 母线。DFIG 模型主要由双馈感应发电机、网侧变流器和转子侧变流器组成。其采用变风速模型,具体风速变化数据如图 2 所示。微电网中的负荷均为综合负荷。孤岛模式下,柴油发电机、DFIG 共同参与调压控制。

1.2 小干扰分析模型

微电网内含有大量电力电子装置,系统的模

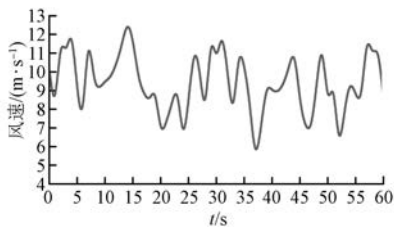


图 2 风速变化曲线

型呈现非线性特性,而其内部的负荷增减等与传统电力系统相类似,也可将其划分为小扰动范围,可实现对系统模型的线性化且不影响分析精度,因此,采用小干扰分析方法对微电网的稳定性进行分析是可行的^[22]。本文使用小干扰分析方法结合动态时域仿真详细研究微电网的电压响应特性,在 DigSILENT/Power Factory 软件中完成了微电网模型的线性化和时域仿真计算。通过计算微电网线性化模型中系统状态矩阵 A 的特征值,可以找出一对决定微电网电压响应特性的特征值。该特征值的轨迹可用以判断微电网小干扰电压稳定性,进而改进微电源电压控制环节参数,实现提高微电网电压响应特性的同时改善其小干扰电压稳定性。

联立光伏、柴油发电机、双馈风力发电机的数学模型,线性化后得到系统状态空间模型如式 (1) 所示:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, A 为一 66 维的系统状态矩阵,包含了微电网所有微电源及其控制系统和负荷的信息。其中:光伏微电源模型由恒定电压源、PWM 变流器和控制系统代替,共含 11 个状态变量;柴油发电机共含 12 个状态变量,内调速器 (gov_ IEEE SG) 使用 4 阶模型,自动电压调节器 (avr_ SEXS) 使用 2 阶模型;DFIG 模型由双馈电机、PWM 变流器和相应控制系统组成,共含 31 个状态变量,内双馈电机使用 4 阶模型,含 4 个状态变量。固定负荷和临时负荷均为综合负荷,由一定比例的恒功率、恒电流、恒阻抗负荷组成,共包含 12 个状态变量。本文使用的仿真事件为 15 s 时负荷突增 1 MW+1.5 Mvar,动态时域仿真时间为 30 s 或 60 s,观察微电网系统状态矩阵 A 的特征值和公共连接点 (Point of Common Coupling,

PCC) 处电压动态响应曲线。

2 微电网控制系统与小干扰分析

2.1 光伏电源控制策略

本文研究的光伏电源渗透率较低, 不参与调压。为了最大化利用太阳能, 光伏电源按恒功率 (P - Q) 控制模式运行, 在所仿真的较短时间内, 可以假设孤岛运行时间内光照强度和温度不变, 光伏电源处于最大功率运行点。PWM 变流器采用 P - Q 解耦的电流控制策略。光伏电源 P - Q 控制结构如图 3 所示。由图 3 可知, P_{ref} 和 Q_{ref} 通过功率外环、电流内环两 PI 环节分别控制 d 、 q 轴电流恒定, 控制逆变器输出恒定功率^[23]。

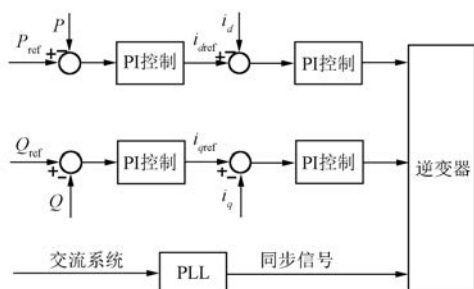


图 3 光伏电源 P - Q 控制结构

2.2 柴油发电机控制策略

柴油发电机配备调速器和自动电压调节器模型参与孤岛模式下微电网调频调压。为带有 Q - V 下垂控制的自动电压调节器励磁结构如图 4 所示。

其中, K_{q*} 为柴油发电机的下垂系数, Q_{ref} 、 Q

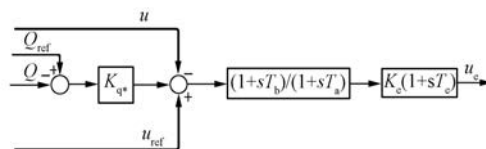


图 4 自动电压调节器励磁环节

为柴油发电机无功功率的参考值和实测值, u_{ref} 、 u 为机端电压参考值和实测值, T_a 、 T_b 和 T_e 为时间常数, K_e 为励磁增益, u_e 为输出的励磁电压。微电网在遇到负荷增减等小扰动事件下发生电压偏移时, 下垂控制使柴油发电机所发无功功率的偏差转化为对应的电压信号参与电压调节。

微电网电压动态响应特性与下垂系数 K_{q*} 、励磁时间常数 T_e 和负荷特性有关。如图 5 所示为 15 s 时微电网负荷突增 1 MW+1.5 Mvar, 无功下垂系数 K_{q*} 、励磁时间常数 T_e 、恒功率负荷 (CPL) 比例取值不同时系统状态矩阵 A 的特征值和电压动态响应曲线。

结果显示, 相比矩阵 A 的其余特征值, 有一对两个大小相等的实根, 初始值为 -0.633 24, 对应 K_{q*} 、 T_e 、CPL 负荷比例的初始值为 $K_{q*}=0.1$, $T_e=0.1$, $CPL=0$, 其受 K_{q*} 、 T_e 、CPL 负荷比例取值变化影响最大, 从两个大小相等的实根变为一对共轭复根, 实部向原点接近, 阻尼减小。同时, 由计算的参与因子结果显示, 柴油发电机的自动电压调节器、DFIG 电压控制环节中的状态变量均对该振荡模态产生相互作用, 因此该模态反映了电压波动特性, 对应的特征值为反映电压动态响应特性的典型特征值。

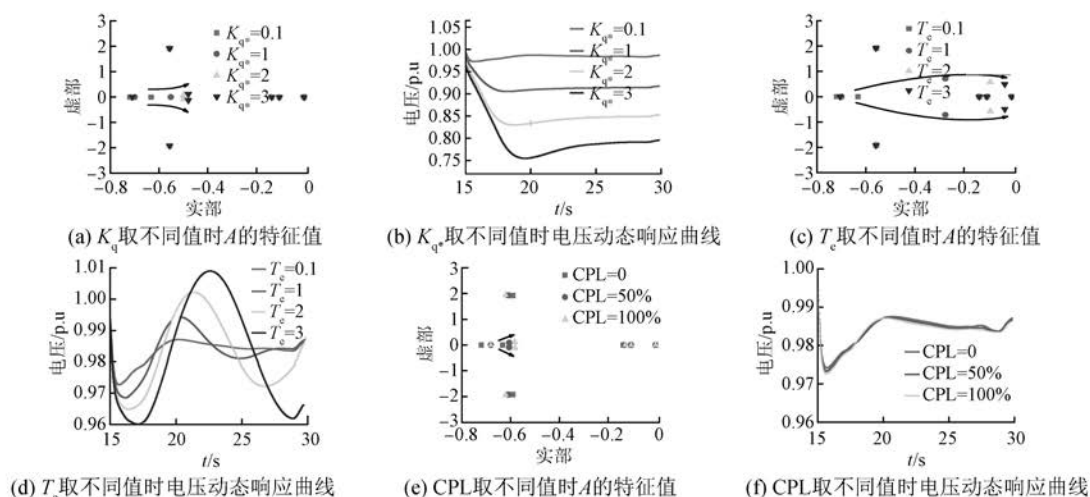


图 5 柴油发电机参数变化下微电网特征值、电压动态响应曲线

电压曲线最低点和响应时间均受 K_{q*} 、 T_e 、 CPL 负荷比例取值的影响。对比图 5(a)、图 5(c)、图 5(e) 可以看出,电压控制的典型特征值的轨迹变化反映了电压动态响应特性曲线的变化。

2.3 DFIG 无功电压控制策略

DFIG 的无功功率极限由定子侧和网侧换流器的无功能力决定。由于网侧换流器发出或吸收的无功功率比较小,所以 DFIG 传输的无功功率近似等于定子侧的无功功率。忽略 DFIG 定子电阻可得定子侧无功功率最大和最小极限^[13]:

$$\begin{cases} Q_{s\max} = -\frac{3U_s^2}{X_s} + \sqrt{\frac{9U_s^2 X_m^2 I_{r\max}^2}{X_s^2} - P_s^2} \\ Q_{s\min} = -\frac{3U_s^2}{X_s} - \sqrt{\frac{9U_s^2 X_m^2 I_{r\max}^2}{X_s^2} - P_s^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q_s 、 P_s ——定子输出的无功功率和有功功率;

U_s ——定子电压;

X_s ——定子电抗;

X_m ——激磁电抗;

$I_{r\max}$ ——最大转子电流。

DFIG 定子侧无功极限主要由转子侧变流器 (Rotor-Side Converter, RSC) 电流最大值约束限制。本文通过在 RSC 中设计无功控制,输出 DFIG 定子侧的无功功率,为微电网提供电压支撑,RSC 无功控制框图如图 6 所示。

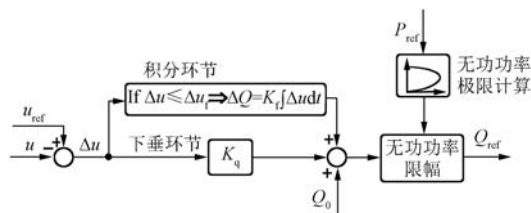


图6 RSC 无功控制框图

图6中, K_q 为 DFIG 的无功下垂系数, u_{ref} 、 u 为电压参考值和实测值。在变风速条件下,DFIG 的有功功率输出变化也会导致微电网电压波动,仅依靠定下垂系数的 $V-Q$ 下垂控制无法得到较好的调压效果,特引入一个电压积分逻辑环节来减小余差。图6中积分环节的 Δu_f 为动作阈值,在本微电网模型中初始值设为 0.03 p.u.,积分时间常数为 1。当 $\Delta u \leq \Delta u_f$ 时,即电压波动幅度较小,输出相应的无功补偿量 ΔQ ,弥补一定的无功

差额,与 $V-Q$ 下垂控制共同作用抑制电压波动;相反,当 $\Delta u > \Delta u_f$ 时,仅留有 $V-Q$ 下垂控制作用,与柴油发电机的下垂控制构成对等控制,这是考虑到微电网中常发生微电源投切活动,对应着电压波动幅度较大情况,对等控制下当有微电源投入或切出时,对其他微电源影响较小,稳定性高,可实现“即插即用”,而且可以降低系统成本。 P_{ref} 为根据文献[23]中 DFIG 有功频率控制设计所得到的有功功率参考值,在变风速条件下, P_{ref} 经过对应式(2)的无功功率极限计算环节,得到无功控制部分的限幅值,从而不越过当前风速下 DFIG 有功功率对应的无功功率极限。该设计既能保证 DFIG 的调频能力,又能充分利用 DFIG 定子侧无功功率。 Q_0 为初始时系统稳定状态下 DFIG 需发无功,此时系统电压稳定,DFIG 所发无功 Q_0 为 0。

图7(a)为无 RSC 调压控制和有 RSC 调压控制时系统状态矩阵 A 的特征值计算结果,图7(b)为相对应的微电网发生负荷扰动时电压动态响应曲线。可以看到参与调压的 DFIG 接入微电网后明显改善了调压效果以及对应的典型特征值的分布,而且随着 RSC 调压控制的接入,特征值向小干扰稳定方向移动。

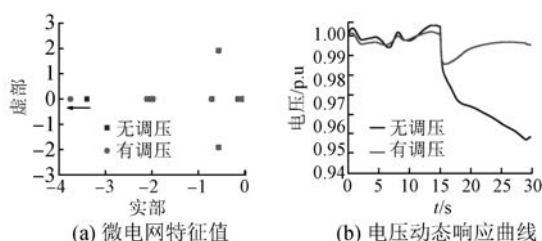


图7 DFIG 参与下微电网的特征值、电压动态响应曲线

3 双馈风机控制参数调试

3.1 下垂系数

如上所述,微电网发生负荷扰动时电压将发生波动,RSC 无功控制 $V-Q$ 下垂环节可在一定程度上抑制电压波动。不同下垂系数时微电网特征值、电压动态响应曲线如图8所示。图8(a)所示为微电网发生负荷扰动时,DFIG 积分环节比例系数 K_f 固定为 5,无功下垂系数 K_q 取不同值时系统电压动态响应曲线。可以看到, K_q 在一特定范围内增加时,电压最低点逐渐抬升,动态响应的时间也减小,虽然总体稳定性提高了,但是电压稳态偏差略有增

大;另一方面, K_q 过小时电压波动明显较严重。图 8(b)特征值计算结果也说明, K_q 在此范围内增加时,典型特征值向系统稳定方向移动;若 K_q 过小,DFIG 不能充分利用机组实时可用无功容量,则微电网受到负荷扰动时电压跌落过大,系统电压响应扰动的过长,不利于微电网的安全稳定运行。

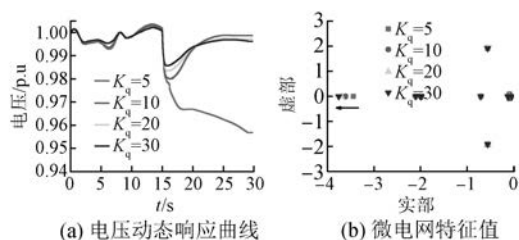


图 8 不同下垂系数时微电网特征值、电压动态响应曲线

综合上文所述,DFIG 无功下垂系数取较大值时可以改善小干扰电压稳定性,但是电压稳态偏差略有增大的问题也要改进;而 DFIG 无功下垂系数过小时会导致电压的跌落,削弱微电网系统的小干扰电压稳定性。下垂系数的选取会对系统的电压质量和动态性能产生影响,最终确定时可能要折中考虑^[24]。如何改善以上问题对于微电网电压安全稳定具有一定的意义。

3.2 DFIG 无功功率控制系统 PI 参数改进

针对上文 DFIG 无功控制中下垂系数选取带来的问题,尝试调试 DFIG 无功控制中积分环节比例系数 K_f ,初始值为 5,最大值到 55,最小值为 1。系数 K_f 数值变化时典型特征值随 PI 参数改变的计算结果如图 9 所示。

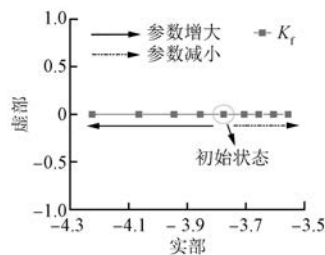


图 9 典型特征值随 PI 参数改变的轨迹

以图 9 中初始状态为起点,实线箭头表示系数增大时典型特征值的变化方向,虚线箭头表示系数减小时典型特征值的变化方向。从图 9 可以看出,增大系数 K_f 数值时典型特征值向系统更加稳定方向移动显著,因此推断增大 K_f 可有效增加

典型特征值对应振荡模态的阻尼,增强微电网电压稳定性,下面进行验证。

改进 K_f 前后微电网电压动态响应曲线,如图 10 所示。图 10(a)为 K_q 取较大值 30、改进积分环节比例系数 K_f 分别为 5 和最大值 55 时,微电网受到负荷扰动时的电压动态响应曲线,可知,改进后的电压响应曲线得到优化,电压稳态偏差明显减小;图 10(b)所示为 K_q 取 5、改进积分环节比例系数 K_f 分别为 5 和最大值 55 时的电压动态响应曲线,可看出,改进系数 K_f ,在下垂系数较小时能显著稳住电压响应趋势。

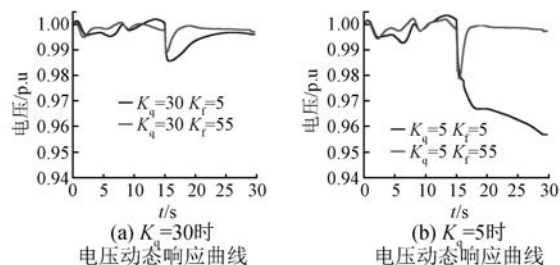


图 10 改进 K_f 前后微电网电压动态响应曲线

图 11 所示为改进积分环节比例系数 K_f 后,下垂系数 K_q 取不同值时系统状态矩阵 A 的特征值计算结果。对比图 8(b), K_q 取不同值时典型特征值对应振荡模态的阻尼增大,随着 K_q 的增大,典型特征值不仅向系统稳定方向移动,而且对 K_q 取值变化的灵敏度有所增加。因此结合图 10 可知,增大 K_f 可改善 DFIG 无功控制中下垂系数选取带来的问题且进一步巩固了系统的稳定性,既提高了 DFIG 参与微网调压的效果,又使微电网拥有更好的小干扰电压稳定性。

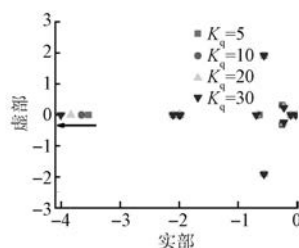


图 11 改进 K_f 后微电网特征值

4 仿真实验

在 DIgSILENT/Power Factory 软件中搭建前文所述的 10 kV 中压微电网模型。柴油发电机配

备调速器和自动电压调节器模型参与孤岛模式下微电网调频调压;DFIG 通过所提出的无功电压控制参与微电网调压。考虑到系统小干扰稳定性,DFIG 参与调压时, K_q 取 30。在变风速条件下,15 s 时微电网负荷突增 1 MW+1.5 Mvar,不同控制方式下 PCC 点处电压动态响应曲线、电压波动的最低点以及 DFIG 定子侧所发无功功率分别如图 12、表 2 和图 13 所示。

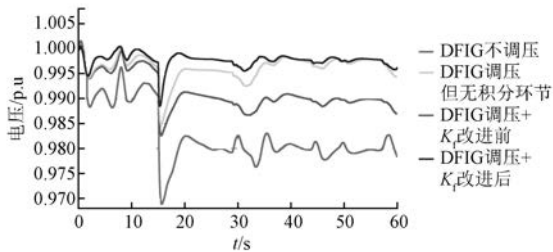


图 12 微电网电压动态响应曲线

表 2 微电网电压最低点

控制方式	电压最低点/p.u
DFIG 不调压	0.968 87
DFIG 调压但无积分环节	0.982 60
DFIG 调压+ K_q 改进前	0.984 68
DFIG 调压+ K_q 改进后	0.988 48

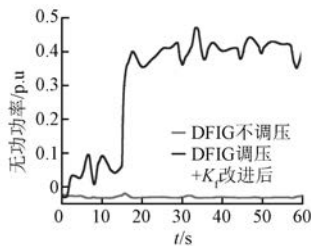


图 13 DFIG 定子侧所发无功功率

由表 2 知,微电网在 15 s 时受到负荷扰动,在 DFIG 不调压即没有调压控制下,仅由柴油发电机提供微电网电压支撑,PCC 节点处微电网电压下降最大,电网电压跌幅近似 3.2%;经过控制方式的逐步改进,电压调节效果也逐渐改善,尤其是系数 K_q 改进后,含有积分环节的 DFIG 参与调压,此时电压最低点为 0.988 48 p.u.,跌幅约控制在 1.2%,而且从图 12 中也易看出电压响应扰动的时间也减小了。图 13 表明 DFIG 参与调压且参数改进后,相比没有调压控制能够发出较大的无功,充

分利用了 DFIG 的无功调节能力,有利于为微电网提供就地无功平衡。因此,本文提出的策略和分析方法对促进 DFIG 参与微电网调压有效果,对改善微电网小干扰电压稳定也具有重要意义。

5 结 语

本文搭建了一个包含 DFIG 风电机组的典型孤岛模式风光柴中压微电网模型。这是针对微电网发生负荷扰动时的电压控制要求和稳定性,建立的微电源电压控制模型和微电网线性化小干扰分析模型。DFIG 无功控制采用 $V-Q$ 下垂控制,且考虑到 DFIG 变风速下其有功输出变化引起的风机出口端电压的波动,在 $V-Q$ 下垂控制中引入一个积分逻辑环节,同时计算变风速情况下 DFIG 有功功率对应的无功功率极限,对 $V-Q$ 下垂控制与积分环节进行限幅。通过小干扰分析法找出了一对反映电压响应特性的典型特征值,分析 DFIG 无功下垂系数 K_q 取不同值时对典型特征值分布轨迹的影响,并结合时域仿真结果,得到 DFIG 无功下垂系数较大时电压稳态偏差略有增大,而下垂系数过小时会导致电压跌落的结论。经过参数改进后既提高了 DFIG 参与微电网调压的效果,又使微电网在改进后的各微电源协调作用下拥有更好的小干扰电压稳定性。所提出的策略和分析方法对促进 DFIG 参与微电网调压、改善微电网小干扰电压稳定具有重要意义。

【参考文献】

[1] 占伟强,吴振兴,刑鹏翔,等.虚拟同步发电机及其在独立型微电网中的应用[J].电机与控制应用,2017,44(4): 14-27.

[2] TANG X S, HU X, LI N N, et al. A novel frequency and voltage control method for islanded microgrid based on multienergy storages[J].IEEE Transactions on Smart Grid,2016,7(1): 410-419.

[3] 王鹤.含多种分布式电源的微电网运行控制研究[D].北京:华北电力大学,2014.

[4] LIU S C, WANG X Y, LIU P X. Impact of communication delays on secondary frequency control in an islanded microgrid[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2015,62(4): 2021-2031.

[5] 赵晶晶,吕雪,符杨,等.基于可变系数的双馈风机虚拟惯量与超速控制协调的风光柴微电网频率调

- 节技术[J].电工技术学报,2015,30(5): 59-68.
- [6] ARANI M F M, MOHAMED Y A R I. Analysis and mitigation of undesirable impacts of implementing frequency support controllers in wind power generation in [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(1): 174-186.
- [7] 潘文霞,全锐,王飞.基于双馈风电机组的变下垂系数控制策略[J].电力系统自动化,2015,39(11): 126-131,186.
- [8] WANG Y, DELILLE G, BAYEM H, et al. High wind power penetration in isolated power systems – assessment of wind inertial and primary frequency response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2412-2420.
- [9] 丁磊,尹善耀,王同晓,等.考虑惯性调频的双馈风电机组主动转速保护控制策略[J].电力系统自动化,2015,39(24): 29-34,95.
- [10] 付媛,王毅,张祥宇,等.变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制[J].中国电机工程学报,2014,34(27): 4706-4716.
- [11] 赵晶晶,符杨,李东东.考虑双馈电机风电场无功调节能力的配电网无功优化[J].电力系统自动化,2011,35(11): 33-38.
- [12] 王松岩.双馈感应发电机型风电场的无功电压控制问题研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [13] 王松,李庚银,周明.双馈风力发电机组无功调节机理及无功控制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(16): 2714-2720.
- [14] KIM Y S, KIM E S, MOON S I. Frequency and voltage control strategy of standalone microgrids with high penetration of intermittent renewable generation systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 718-728.
- [15] ZIADI Z, OSHIRO M, SENJYU T, et al. Optimal voltage control using inverters interfaced with pv systems considering forecast error in a distribution system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 682-690.
- [16] KIM J, SEOK J K, MULJADI E, et al. Adaptive Q-V scheme for the voltage control of a DFIG-based wind power plant [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3586-3599.
- [17] 林舜江,李欣然,刘杨华.考虑负荷动态模型的在线小干扰电压稳定指标[J].电力系统自动化,2008,32(9): 25-29.
- [18] KUNDUR P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 1387-1401.
- [19] 杨浩,牛强,吴迎霞,等.负荷中心含微电网的小干扰电压稳定性分析[J].电力系统保护与控制,2010,38(18): 38-43.
- [20] WILCHES-BERNA F, CHOW J H, SANCHEZ-GASCA J J. A fundamental study of applying wind turbines for power system frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1496-1505.
- [21] FREITAS W, SILVA L C P D, MORELATO A. Small-disturbance voltage stability of distribution systems with induction generators [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1653-1654.
- [22] 马添翼.孤岛模式下微网的性能优化控制策略研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- [23] ZHAO J J, LYU X, FU Y, et al. Coordinated microgrid frequency regulation based on DFIG variable coefficient using virtual inertia and primary frequency control [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(3): 833-845.
- [24] 王旭斌,李鹏.微网孤岛运行模式下的新型负荷分配控制策略[J].电网技术,2014,38(1): 181-187.

收稿日期: 2017-07-10

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部