

引用格式:何鑫,刘翠,李芸.不同运行方式的大规模新能源接入电网后的调频特性研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):168-176.

Citation: HE Xin, LIU Cui, LI Yun. Study on frequency regulation characteristics of power grids after large-scale new energy integration under different operation modes[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 168-176.

不同运行方式的大规模新能源接入 电网后的调频特性研究

何鑫¹, 刘翠², 李芸³

(1. 云南电网有限公司电力科学研究院, 云南昆明 650217; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川成都 611756;
3. 芯昇科技有限公司, 北京 100032)

摘要:给出了双馈风力发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)参与电网调频的基本数学模型,推导出了大规模风电接入电网后,在不同运行方式(如惯性控制或者最大功率跟踪)下风电功率的渗透率、可调频风电机组所占比例以及风电机组的频率调节系数等与风电利用率之间的关系,提出了不同运行方式的风电机组参与电网调频的控制策略。以南方某片区电网为例,分析了风速改变及负荷变化的情况下风电功率注入比例对接入电网调频的影响特征,验证了可调频新能源发电对电网调频作用的有效性。将可调频风电机组接入4机2区域的电网模型,给出风电注入比例不同情况下所需要的可调频风机所占比例最小值及电网对新能源的综合承载能力。仿真结果表明,大规模风电场参与调频时应尽可能使运行在额定风速附近的机组参与调频,从而最大程度确保电网的频率偏差变小,维持频率在安全运行范围内。

关键词:电力系统;调频特性;可调频新能源发电;双馈风力发电机;风电渗透率

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.03.019 中图分类号: TM712 文章编号: 1673-9140(2024)03-0168-09

Study on frequency regulation characteristics of power grids after large-scale new energy integration under different operation modes

HE Xin¹, LIU Cui², LI Yun³

(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 3. Xinsheng Technology Co., Ltd., Beijing 100032, China)

Abstract: The basic mathematical model of doubly-fed induction generator (DFIG) participating in grid frequency regulation is presented. The relationship between wind power penetration, the proportion of wind turbines with adjustable frequency ability, the frequency regulation coefficient of wind turbines, and wind power utilization is derived under different operating modes (such as inertia control or maximum power tracking) after large-scale wind power is connected to the grid. The control strategies for wind turbines to participate in grid frequency regulation under different operating modes are proposed. Taking a grid in southern China as an example, the impact characteristics of wind power injection ratio on grid frequency regulation under changing wind speed and load conditions are analyzed, and the effectiveness of renewable energy generation with adjustable frequency ability in grid frequency regulation is verified. By connecting wind turbines with adjustable frequency ability to a 4-machine 2-area grid model, the minimum proportion of required wind turbines and the comprehensive carrying capacity of the grid for renewable energy under different wind power injection ratios are presented. Simulation results show that when large-scale wind farms participate

收稿日期: 2023-03-08; 修回日期: 2023-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(52277129)

通信作者: 刘翠(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事新能源并网发电技术及储能运行控制等研究; E-mail: 724231061@qq.com

in frequency regulation, it is advisable to involve turbines operating near rated wind speed to minimize grid frequency deviation and maintain frequency within the safe operating range.

Key words: power system; frequency regulation characteristics; frequency-adjustable power generation by new energy sources; doubly-fed induction generator; wind power penetration

近年来,中国南方某些地区电网中新能源渗透率已经大大超过了预期水平。以新能源中的风力发电为例,目前双馈风力发电机(doubly-fed induction generator,DFIG)已逐渐成为风电市场的主流机型,但DFIG的转速控制导致其与电网为“柔性”连接,使得转子所蕴含的旋转动能不能以惯性动能的形式对接入电网有所贡献,在一定程度上恶化了电网原有的频率调节功能。当电网中的风电接入比例持续增加时,这些负面影响也会逐渐加剧。因此,研究大规模新能源对接入电网频率稳定运行的影响具有重要的应用价值^[1-7]。

近年来,学者对新能源参与电网调频开展了大量研究并提出了许多有效措施。针对不同类型新能源的频率特性与常规发电机组有较大差异的问题,文献[8-9]对DFIG并网后电网的频率响应特性进行了仿真和分析,提出以转子磁链位置为变量控制转子转速变化的方法,进一步改变DFIG机组的出力变化。文献[10-11]通过控制DFIG的转速使得风电机组将隐含的惯量 H 显化出来,引入频率控制环节,使得具有大比例DFIG机组的大规模风电场具有参与电网频率调节的功能和作用。文献[12-13]提出了一种风力发电机与常规同步发电机相协调的频率调整方法,引入附加模拟惯量并引入到转速控制系统,可使风力发电机运行更加稳定。以上文献主要通过显化风力发电机的转动惯量 H 参与电网一次调频的过程,并没有涉及二次调频的响应过程,缺点在于仅能进行短暂的惯性功率支援而不能向电网输出持续的功率。

文献[14]针对风电机组的运行特性,将惯性控制和下垂特性结合起来,引入风电机组的转速控制器,以参与电网的频率调整过程^[15-17]。文献[18-19]通过风电机的惯性和下垂控制等2种方法对转子转速的控制效果进行了对比研究,认为恒定不变的下垂系数具有使风电机组失速的潜在危险,并给出了一种整定下垂系数的方法和步骤。文献[20]对近年来风电参与电网调频的研究进展进行了综述分析。在风电接入对电网暂态特性影响方面,文献[21-24]用仿真方法研究了DFIG接入对电网暂态稳定造成的影响,主要强调了高渗透率风电对电网运行造成

的不利影响,并提出一定的改善措施。以上文献针对的主要是单个风电机接入电网后的频率控制策略,并没有对风电参与调频后的电网调频机理展开深入研究。

本文首先给出风电机组参与电网调频的基本数学原理,推导出风电场渗透率、可调频风电机组所占比例以及风电机组的频率调节系数和风电利用率之间的数学模型,根据DFIG机组参与电网频率控制的方式建立频率控制模型;给出不同运行方式的风电机组参与电网调频的控制策略;结合实际电网研究含高渗透率风电对电网频率动态特性的影响,证实可调频风电在调频过程中的有效性;接着,分析在不同的风电接入比例时保证电网频率在国家标准范围内的可调频风机所占最小比例,通过可参与电网调频的风机所具有的调频能力及风电利用率分析不同风速下电网对风电的综合承载能力。

1 DFIG参与电网调频的数学模型

1.1 DFIG的功率-频率特性

风电场中的风电机组有2种不同的运行方式,即最大功率点跟踪(maximum power point tracking,MPPT)运行方式和参与电网调频的减载控制方式。为了最大限度地获取风能,在低于额定风速时DFIG采用MPPT方式运行,此时DFIG无法储备能量响应电网的频率变化。如果改变DFIG的运行方式,即通过超速法使DFIG的转子工作在大于MPPT时的旋转速度,并固定转子的励磁电流频率,此时DFIG虽不能获取最大的风能,但转子可以储备一定的动能,其动态特性等同于一个同步发电机,并具有参与电网一次调频的能力。超速控制原理如图1所示,图中根据风电机组的运行特性得到不同风速时定桨距控制下输出功率 P_T 与转速 ω 的关系,连接不同风速下的最大功率点可得到最佳功率 P_{opt} 曲线(即MPPT曲线)。理论上说,通过超速和减速方法都能实现减载从而储备能量的目的,但是风电机组转速降低时其输出有功功率也降低,会导致静态不稳定^[2,19];但是采用超速法时,风电机组转速降低时其输出有功功率增加,是静态稳定的。因此,超速法是一种能变速减载的稳定控制方式。

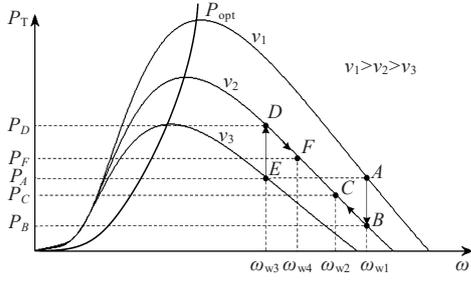


图1 DFIG机组的超速控制方法

Figure 1 Over-speed control method of DFIG

图1中,风速为 v_1 时,DFIG运行于A点;风速突变减小为 v_2 时,风电机组获得的机械功率下降,由于惯性的作用,转速 ω_{w1} 不会突变,但风电机组的运行点已由A点突变到B点,输出的功率也由 P_A 下降到 P_B 。风电机组转子轴上的功率不平衡导致风电机组沿曲线BC上升。为使系统频率稳定,需要调节转差角速度,给定风机一个合适的参考速度为 ω_{w2} ,风电机组输出功率为 P_C ,频率上升,最后重新稳定运行在点C。风速增加时的控制步骤与上述类似,不再赘述。

当DFIG不跟随最大功率点运行时,通过控制DFIG的转子速度变化,并利用转子的转动动能可得其可输出的惯性功率 P 为

$$P = \frac{dE_k}{dt} = J\omega_t \frac{d\omega_t}{dt} \quad (1)$$

式中, J 、 E_k 为风电机组的转动惯量和旋转动能; ω_t 为角速度。根据传统定义可知,风电机组的惯性时间常数 H 为

$$H = \frac{1}{2} \cdot \frac{J\omega_s^2}{S} \quad (2)$$

式中, ω_s 为额定转速; S 为视在功率。由式(1)、(2)得:

$$\frac{P}{S} = 2H \frac{\omega_t}{\omega_s} \frac{d(\omega_t/\omega_s)}{dt} \quad (3)$$

用标么值表示的惯性功率 P_* 为

$$P_* = 2H\omega_{t*} \frac{d\omega_{t*}}{dt} \quad (4)$$

式中, ω_{t*} 为角速度的标么值。

根据式(4)可知,在DFIG的转速控制系统中引入频率控制模块,可将其隐含的惯量显化出来,呈现出类似同步发电机的惯性特征,从而实现DFIG机组通过改变转子转速释放或吸收部分转动能以响应电网的频率动态过程。

1.2 风电参与电网一次调频的数学原理

设风电功率 P_{wt} 接入后,电网中同步发电机的功

率为 P_G ,负荷功率为 P_L ,则有:

$$P_{wt} + P_G = P_{wt} + \gamma P_{GN} = P_L \quad (5)$$

式中, P_{GN} 为同步发电机的额定容量; $\gamma = P_G/P_{GN}$,为发电机的负载率。

根据电网的频率一次调整特性,风电参与调频时若系统负荷变化为 ΔP_L ,则有:

$$\Delta P_G + \Delta P_w - \Delta P_L = K_T \Delta f \quad (6)$$

式中, ΔP_w 和 ΔP_G 为风电机组和常规发电机的出力增量; Δf 为频率偏差; K_T 为电网的总频率调节系数。进一步可得:

$$K_T = K_G + K_L + K_w \quad (7)$$

式中, K_w 、 K_L 和 K_G 分别为风电机组、负荷和同步发电机的频率调节系数, MW/Hz。

定义1:风电场的渗透率 ξ 为风电场发出的总功率 P_{wt} 与电网中总负荷量 P_L 的比值,即

$$\xi = P_{wt}/P_L \quad (8)$$

定义2:风电场的调频比 η 为参与调频的机组功率 P_w 与风电场总功率 P_{wt} 之比,即

$$\eta = P_w/P_{wt} \quad (9)$$

式中, η 代表风电场中风电机组的不同运行方式。

根据式(5)~(9)可求出:

$$\begin{cases} \frac{P_{GN}}{P_L} = \frac{1-\xi}{\gamma} \\ \frac{P_{wt}}{P_{GN}} = \frac{\gamma\xi}{1-\xi} \end{cases} \quad (10)$$

以及 K_G 、 K_w 和 K_L 分别为

$$\begin{cases} K_G = \frac{\Delta P_G}{\Delta f} = \frac{P_{GN}}{f_N \sigma_G} \\ K_w = \frac{\Delta P_w}{\Delta f} = \frac{P_w}{f_N \sigma_w} = \xi \eta \frac{P_L}{f_N \sigma_w} \\ K_L = \frac{\Delta P_L}{\Delta f} = K_{L*} \frac{P_L}{f_N} \end{cases} \quad (11)$$

式中, f_N 为工频50 Hz; σ_G 、 σ_w 为同步发电机和风力发电机的调差系数; K_{L*} 为负荷的频率调节系数标么值,通常为 1.5% ^[25]。

进一步地,求出总调节系数 K_T 的标么值和以负荷功率为基值的总调差系数 σ_T 为

$$K_{T*} = K_T \frac{f_N}{P_L} = \frac{1}{\sigma_T} \quad (12)$$

将式(7)、(11)代入式(12),并整理为

$$\frac{1}{\sigma_T} = \frac{P_{GN}}{P_L \sigma_G} + \frac{\xi \eta}{\sigma_w} + K_{L*} \quad (13)$$

式中,等式右边第1项表示同步发电机的调差作用;第2项表示风电并网且参与调频后对电网调差系数

的影响,其大小不影响电网中同步发电机的调差作用;第3项表示负荷的频率调节系数标么值。

风电机组承担的功率变化量 ΔP_w 为

$$\Delta P_w = K_w \Delta f = \frac{\xi \eta P_L}{f_N \sigma_w} \Delta f \quad (14)$$

式(14)表示参与电网调频的风电机组所占比例 η 越大,以及风电渗透率 ξ 越大,风电功率的变化量 ΔP_w 越大,由式(13)可知电网的调差系数 σ_T 越小,风电的调频作用愈加显著。

综上所述,为了使具有调频功能的风电功率能够有效参与电网调频且尽量减少弃风而充分发挥风力发电的作用,需要给出不同风电功率比例下风电场中可调频风电所占最小比例的整定方法。

当系统负荷发生突变且增量为 ΔP_L 时,若要确保系统的频率变化 $|\Delta f| \leq 0.2$ Hz,根据式(6)可得:

$$\Delta P_w \geq K_T \Delta f - \Delta P_G + \Delta P_L = (K_T - K_G) \Delta f + \Delta P_L \quad (15)$$

可见,当同步发电机和系统总的频率调节系数 K_T 和 K_G 恒定时,负荷的变化量 ΔP_L 将由可参与电网调频的风电功率 ΔP_w 全部承担。设负荷突变量 ΔP_L 所占总负荷 P_L 的比例 ε 为

$$\varepsilon = \Delta P_L / P_L \quad (16)$$

由式(14)、(15)可看出,当渗透率 ξ 一定时,根据频率变化量 ΔP_L 可确定参与电网调频风电机组的最小比例 η 。

1.3 风电机组的综合承载能力分析

传统风电机组的有功出力 P_w 表达式为

$$P_w = \frac{1}{2} \rho S C_p v^3 \quad (17)$$

式中, ρ 为空气的平均密度; S 为桨叶扫过的面积; C_p 为风能利用的效率系数; v 为风速。

如果改变DFIG机组的运行方式,通过超速控制使风机加速,偏离MPPT工作点减载,或者改变桨距角使其减少从风中获得的功率,可使DFIG机组具备参与电网调频需要的功率储备^[26]。

定义3:DFIG的利用系数 β 为参与电网调频的风电机偏离MPPT运行点后实际发出电磁功率 P_w 与其最大功率 P_{wm} 之比,即

$$\beta = P_w / P_{wm} \quad (18)$$

定义4:DFIG的功率储备系数 K_p 为风电机组可调节的功率 ΔP_w 与其最大功率 P_{wm} 之比,即

$$K_p = \frac{\Delta P_w}{P_{wm}} = \frac{P_{wm} - P_w}{P_{wm}} = 1 - \beta \quad (19)$$

式中, K_p 取值范围通常为 $-10\% \sim 6\%$ ^[27],其物理意

义是:为了响应电网的频率变化和有功功率需求并保持频率稳定在国家标准的范围内,DFIG机组运行点偏离最大功率点后具有的能量储备系数,其值与风电机组储备能量大小成正比。

结合式(17)、(19)可知,DFIG在低风速时输出功率小且能量储备也少,不具备参与电网调频的能力;但在高风速运行时,储备能量较高故参与电网调频的能力较强;不过,此时风电利用率下降即弃风率较高。因此,不同的风速下风电机组的调频能力及储备能量不同,弃风率也不同,需要合理地选择参与电网调频的机组。进一步地,由式(17)~(19)可推导出:

$$\frac{1}{\beta} = 1 + \frac{\Delta P_w}{P_w} = 1 + \frac{2\Delta P_w}{\rho S C_p v^3} \quad (20)$$

由式(14)知,当风电场渗透率确定且全部参与电网调频时,可将其视为单个风电机组参与电网调频,即 ξ 为定值,且 $\eta=1$,将式(14)代入式(20),整理得:

$$\frac{1}{\beta} = 1 + \frac{2\xi P_L \Delta f}{\rho S C_p v^3 f_N \sigma_w} \quad (21)$$

式(21)表明,在同一风速下,当系统频率变化量一定时,风电机组的调差系数 σ_w 越大,风电机组的利用系数 β 越大,即风电机组的调频能力与风电机组利用率成反比。为了减少弃风率而尽量发挥风电机组的最大利用效率,在具有调频功能的风电功率保证调频能力的同时,要对电网中所接入的可调频风力发电机的承载能力即综合调频系数 K 定义如下:

$$K = \alpha_1 K_w(\eta, \xi) + \alpha_2 \beta \quad (22)$$

式中, K_w 是与风电场调频比 η 和风电场的渗透率 ξ 相关的等值调频系数; α_1 、 α_2 为可优化的实数,要根据电网具体情况来确定:如果需要保证电网中风电机组的调频能力, α_1 所占比例较大,从而根据综合系数来选定相应的风速;同样,如果需要保证电网中风电机组的利用率,则 α_2 所占比例较大。一般来说, α_1 和 α_2 可以通过综合比较风电场的历史数据,采用优化方法获得,也可通过经验数据或公式求得。所要遵循的原则是:用最少的调频发电机数量和最小的弃风率获得给定的调频效果。

根据综合调频系数 K 可在保证风电机组利用率及调频能力的基础上确定最佳风速^[2]。风电机组的等值调频系数 K_w 及利用系数 β 的确定方法如下:

1) 给定风速下,将MPPT运行方式的风电机

组接入电网,给定一个负荷增量使电网频率降低0.2 Hz,测量风电功率的总出力;

2) 改变MPPT运行的风电机组为可调频运行方式,测量相同负荷变化时电网频率改变量的最大绝对值;

3) 结合文1.2、1.3所述公式及以上测量值,即可得到给定风速下的等值调频系数 K_w 和利用系数 β 。

2 DFIG 参与电网一次调频控制模型

根据风电参与电网调频的基本原理,本文中DFIG机组采用的频率控制模型如图2所示^[15-18]。该模型具有5个模块,其功能分别为转速控制、下垂控制、惯量控制、桨距角控制和转速保护及功率判定等。

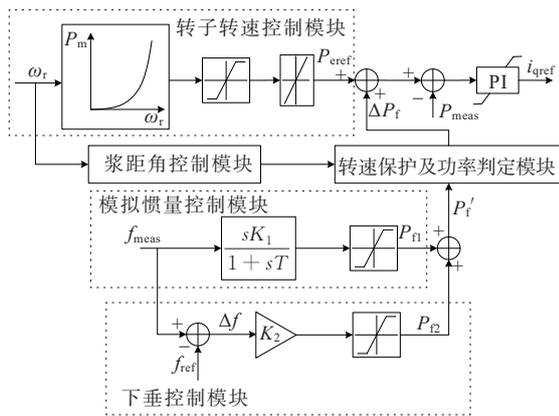


图2 DFIG参与电网调频的控制模型

Figure 2 Control model of DFIG participating in frequency regulation of power grids

图2中,当DFIG的转速下降到 ω_{min} 时,要将功率判断模块的输出有功 ΔP_p 设置为0,屏蔽其参与调频的功能,目的是防止风电机组失速。功率判定模块的作用是避免参与电网调频的风电功率 P' 超过其备用功率 ΔP 。桨距角控制模块的作用是限制风速高于额定值时的功率获取情况,保证风电机组在高风速时的安全运行,其控制模型如图3所示。

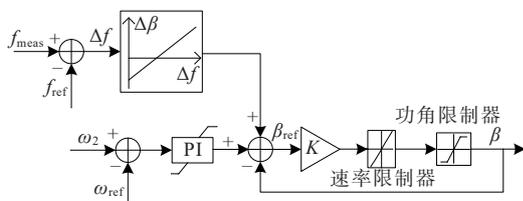


图3 桨距角控制模型

Figure 3 Control model of pitch angle

另外需要注意的是,当风速到达切出风速时,即使将风机的桨距角切换到 90° 的情况,DFIG 同样不具备超速减载调频的能力,因此,在这种情况下风机将不再通过桨距角控制改变功率输出,而是通过顺桨的方式将风机缓缓切出,退出运行,确保风机本身的安全。

3 风电场参与一次调频的控制策略

风电场参与电网调频控制策略的基本思想是如何在最少风电机组参与电网调频的情况下既能保证系统频率的稳定,又能尽量保证风电场的有功出力。基于上述对风电场参与电网调频的基本原理以及综合调频能力的分析,本文总结出风电场参与调频的控制策略如图4所示,具体流程分述如下。

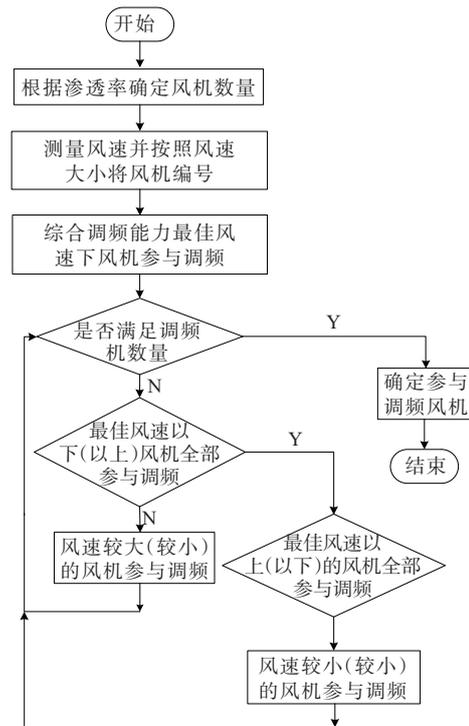


图4 风电场参与电网调频控制策略流程

Figure 4 Control strategy flowchart of wind farms participating in frequency regulation of power grids

- 1) 测量各风电机组所接收到的风速。
- 2) 在风电功率不同比例下,根据参与电网调频的风电机组最小比例计算参与调频的风机具体数量。
- 3) 优先选择根据式(22)计算出的综合调频能力指标最佳的风电机组参与电网的调频过程。
- 4) 如果根据式(22)计算出的参与电网调频的

风电机组数量无法满足需求,则要从运行在低于最佳风速且按照风速依次减小的原则确定和选择参与电网调频的风电机组。

5) 如果执行完上述步骤,可调频风电机组的数量仍然无法满足要求,则顺次根据运行在高于最佳风速但按照风速依次增大的原则选择风电机组。

4 算例分析

4.1 算例 1:风电参与电网一次调频的效果验证

根据国家标准 GB/T 15945—1995 的规定:电网频率运行在 50±0.2 Hz 范围的时间应该高于总运行时间的 98%^[2]。以南方某片区的部分电网为例,图 5 为电网主要接线图。其中,HA、HB、HC 和 HD 为水力发电站,容量分别为 200、70、10、15 MW。WA、WB 和 WC 为风电场,容量分别为 39×1.25、33×1.5、33×1.5 MW。计算可得风电的装机容量为 147.75 MW,大约占总容量的 33.3%,可见该片区的风电比例相对较高。将 3 个风电场的所有风电机组分别等效为 1 台,可得 3 台等值的风电机组,令等值风电机组的输入风速如图 6 所示。

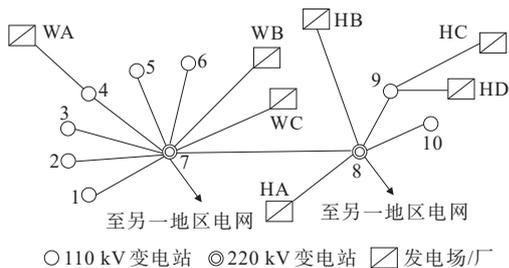


图 5 南方地区某电网地理接线

Figure 5 Geographical wiring diagram of a power grid in southern China

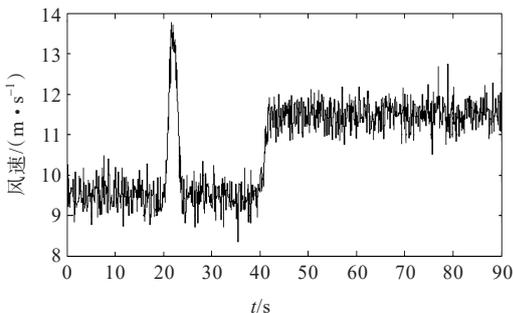


图 6 风速波形

Figure 6 Waveform of wind speed

4.1.1 高渗透率风电对电网调频特性的影响

设 t=70 s 时,图 5 中节点 6 的负荷突然增大。为验证不同的风电渗透率对电网频率动态特性的

影响,在不改变总负荷及总出力的前提下,从风电渗透率为 10% 等差递增 10%~30% 共 3 种情景做验证,分别给出电网的频率变化曲线如图 7 所示。可见,阵风对电网频率影响明显,风电渗透率较高时,频率受随机风速影响的变化幅度也增大。风速较大时,风电机组在 60~70 s 时有功功率即可达最大值,系统的总出力相等。综上所述,风机不参与电网调频时,风电功率为净功率注入,相当于没有惯性的“负”的阻性负荷,因此风电在接入电网中的渗透率越大,导致电网中的平均惯性分布相对越小,这种情况不利于电网的调频功能。

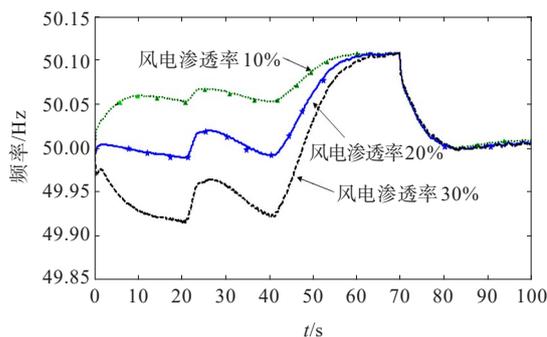


图 7 风电渗透率不同时的电网频率变化曲线

Figure 7 Frequency curves of power grid with different permeability of wind power

4.1.2 一次调频控制策略验证

将前文所述的可参与调频的风电机组替代传统的风电机组,采用图 4 所示的风电参与电网调频控制策略。对比风电功率渗透率为 20% 时,相同扰动作用下电网频率曲线如图 8 所示。可见,具有显化惯性作用的可调频风电功率参与电网调频后确实减小了电网频率的变化率及稳态误差,且削弱了随机风速对频率的影响,但因 DFIG 需要一定的功率储备,故在负荷增大前利用率略有下降。

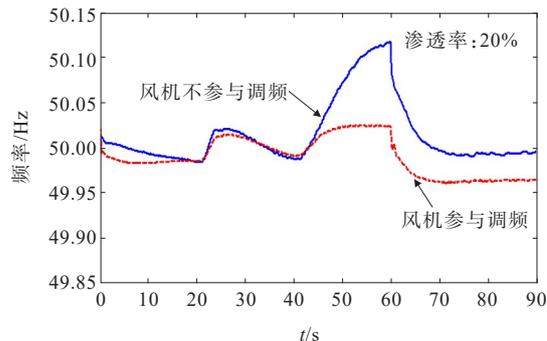


图 8 风电机组参与调频后的电网频率响应曲线

Figure 8 Frequency response curve of power grid after wind turbine participating in frequency regulation

4.2 算例2:风电机组的综合承载能力分析

本文建立了4机2区域电网模型如图9所示。该模型由功率为900 MW的4台同步发电机组成,风电场用1台等值容量为 300×1.5 MW的DFIG机组WF表示并接入母线5处, L_1 和 L_2 为2个区域的等值负荷,负荷总容量为3 000 MW。分析不同渗透率下风电机组所占比例以及风电机组的综合调频能力。给定下列条件:

- 1) 电网频率为50 Hz恒定不变,其变化限制在 ± 0.2 Hz范围内;
- 2) 稳态运行时,风速设定为风电机组可正常运行的最小风速;
- 3) 风电场中所有风机的风速采用同一个数值。

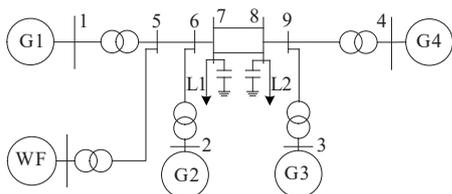


图9 算例结构

Figure 9 Structure of simulation system

4.2.1 不同渗透率下风电机组所占比例

尽管风电参与电网调频关注的是发电侧频率稳定问题,但负荷侧的负荷频率调节效应也通过系数 K_L 予以考虑,见式(7)。为了使风电能够参与电网调频且尽量充分利用风力发电,并获得不同风电渗透率下可调频风电机组所占的最小比例,采用的具体方法如下。

1) 提高风速至DFIG风机可正常运行的风速最大值,改变可调频风电功率所占总风电功率的比例,将电网频率控制在国家标准允许的范围之内,计算可参与电网调频的DFIG风机数量在风电场所有风电机组数量中所占的最小比例 η ;

2) 电网运行稳定后,在运行到 $t=35$ s时,令等值负荷 L_1 增加300 MW,在不超过国家标准允许的范围之内,计算电网所能允许的负荷最大变化率 ϵ 。

给定风电渗透率递增的步长为5%,进行同样的计算可得到渗透率递增的情况下可调频风电功率所占总风电机组发电功率的比例如表1所示。可见,随着渗透率 ξ 的增加,需要增加可调频风电机组所占比例 η 才能有效抑制电网的频率波动,且负荷变化率 ϵ 随之增大,与实际情况相符。不过,可调频风电机组比例 η 过大也会减小风电的利用率。

表1 不同渗透率下可调频风力机所占比例

Table 1 Proportion of frequency-adjustable wind turbines under different permeability

渗透率 $\xi/\%$	风力机比例 $\eta/\%$	负荷变化率 $\epsilon/\%$
5	4.3	6.94
10	16.5	10.09
15	28.6	13.56
20	40.2	17.28
25	55.4	21.96
30	76.8	28.89

4.2.2 不同风速下风电机组的综合承载能力

利用图9所示模型,在负荷突变相同的情况下,利用文1.3的方法分别研究可调频风电机组从最小风速6 m/s到最大风速15 m/s的等值调频系数 K_w 及风电机组利用系数 β ,如图10所示。针对本文算例,为保证风电机组的调频能力,通过综合考虑,给出了式(22)中比例系数的具体数值为 $\alpha_1=2, \alpha_2=1$,进一步可得风速变化时风电场中可参与电网调频的DFIG风电机组的综合系数 K 如图10所示。风电机组为传统风电机组及可调频风电机组等2种情况下得出的频率及功率变化曲线如图11、12,其中 $\Delta f_1, \Delta f_2$ 分别为风电机组参与和不参与电网调频时的频率变化量。

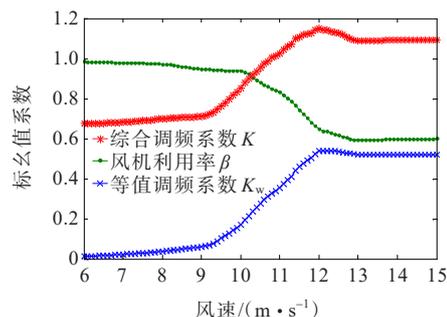


图10 风电机组的等值调频系数 K_w 、综合调频系数 K 和风能利用系数 β

Figure 10 Equivalent frequency regulation coefficient (K_w), integrated frequency regulation coefficient (K) and wind energy utilization coefficient β of wind turbines

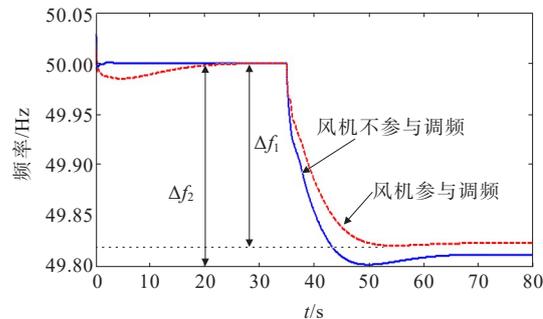


图11 10 m/s风速下的电网频率对比

Figure 11 Comparison of power grid frequency under 10 m/s wind speed

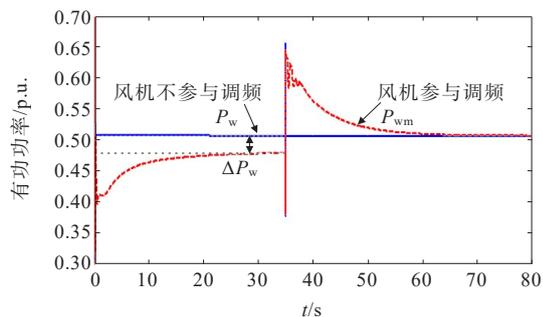


图12 10 m/s风速下的有功功率对比

Figure 12 Comparison of active power under 10 m/s wind speed

图10的曲线表明,等值调频系数 K_w 随风速的增大而增大,风速为12 m/s时, K_w 可求得最大值; β 随着风速增大而减小,在风速为13 m/s时 β 取最小值。当风速高于额定风速时,DFIG风机通过改变桨距角减小从风中获取的机械功率,从而保持发出的功率基本不变。当风速为10~12 m/s时,可参与电网调频的DFIG风机的调频性能最好、风电功率的利用系数也最高。根据近年来的弃风率可知,2012—2014年全国弃风率基本在20%左右,局部地区如吉林省弃风率高达35.2%^[22]。由利用系数 β 得,风速在10~12 m/s的弃风率保持在5%~35%,符合当前弃风的标准。因此,应尽可能使风电场中运行于10~12 m/s风速范围内的风电机组具备参与电网调频的优先级别。

从图11可以看出,在电网中参与调频的同步发电机容量不变的前提下,风电机组参与电网调频后,电网的频率偏差小于风电机组不参与电网调频时的情况,因而可以预计,随着风电渗透率和风能利用系数的增加,通过适当调整风电机组的运行方式,电网的频率偏差可以进一步减小。

从图12可以看出,风电机组不参与电网调频时其发出并注入电网的有功功率恒定不变,这是由于风电机组与电网之间柔性连接的缘故;而风电机组参与调频时,风电机组要响应电网频率变化而调整其有功功率,其原因是参与调频的风电机组与接入电网间为刚性连接,具有相当于一个等值的同步发电机的动态特性。

5 结语

本文给出了不同运行方式的风电机组参与电网调频的数学模型,建立了双馈异步风力发电机组的频率控制模型并给出了风电机组参与电网调频

的控制策略,得到主要结论如下:

1) 建立了风电机组参与电网调频的数学模型,可使其发出的有功功率响应电网的频率变化,表现为参与调频的风电机组在外特性上相当于一个等值的同步发电机;

2) 首次给出了风电参与电网调频后,总调差系数与同步发电机的调差率、负荷的频率调节系数以及风电机组的调差系数、渗透率和风电场的调频比之间的定量关系,并进行了论证和分析;

3) 验证了当风电渗透率一定时,可调频风电机组可有效抑制电网的频率波动,根据频率变化量可确定参与电网调频的风电机组的最小比例以及相应情况下负荷动态变化率最大值;

4) 当风电渗透率不同时,可根据电网的实际运行情况和需求设定优化系数,并通过综合调频系数安排可调频机组所占比例和优化控制策略选择调频机组,从而保证风电场并入电网后安全、经济运行。

参考文献:

- [1] 曹张洁. 双馈感应风电机组参与系统一次调频的控制策略研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
CAO Zhangjie. Study on control strategy of DFIG wind turbine for the participation of system primary frequency regulation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012
- [2] 李芸. 大规模风电场参与调频的控制策略研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
LI Yun. Study on control strategy for large-scale wind farm participating in power grid frequency regulation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [3] 张小莲,孙啊传,郝思鹏,等. 风电场参与电网调频的多机协同控制策略[J]. 发电技术,2024,45(3):448-457.
ZHANG Xiaolian, SUN Achuan, HAO Sipeng, et al. Multi-machine cooperative control strategy of wind farm participating in power grid frequency modulation[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(3): 448-457.
- [4] 屈兴武,王栋,马天诚,等. 支撑电网频率稳定的双馈风机一次调频控制需求分析[J]. 智慧电力,2023,51(10):38-46.
QU Xingwu, WANG Dong, MA Tiancheng, et al. Requirement analysis of DFIG primary frequency regulation control supporting grid frequency stability[J]. Smart Power, 2023, 51(10): 38-46.
- [5] 刘铖,胥冬洋,武诚,等. 考虑频率稳定约束的分布式调相机选址定容策略[J]. 电力建设,2023,44(12):106-114.

- LIU Cheng, XU Dongyang, WU Cheng, et al. Location and sizing strategy of distributed condensers considering frequency stability constraints[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(12):106-114.
- [6] 王中权, 刘维斌, 孙泉雄, 等. 限功率工况风电场一次调频与疲劳抑制协调优化控制研究[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(2):114-121.
- WANG Zhongquan, LIU Weibin, SUN Xiaoxiong, et al. A study on coordinated optimal control for primary frequency regulation and fatigue suppression of wind farms under limited power condition[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(2):114-121.
- [7] 郑云平, 亚夏尔·吐尔洪. 基于VSG技术的风—光—储系统自适应调频控制策略研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(7):12-19.
- ZHENG Yunping, YAXAR-Turgun. Research on adaptive frequency modulation control strategy of wind-PV-storage system based on VSG technology[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(7):12-19.
- [8] OCHOA D, MARTINEZ S. Fast-frequency response provided by DFIG-wind turbines and its impact on the grid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(5):4002-4011.
- [9] ANAYA-LARA O, HUGHES F M, JENKINS N, et al. Contribution of DFIG-based wind farms to power system short-term frequency regulation[J]. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 2006, 153(2):164.
- [10] 姚琦, 刘吉臻, 胡阳, 等. 含异步变速风机的风电场一次调频等值建模与仿真[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(23):185-192.
- YAO Qi, LIU Jizhen, HU Yang, et al. Equivalent modeling and simulation for primary frequency regulation of wind farm with asynchronous variable-speed wind turbines[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(23):185-192.
- [11] SUN L, LIU K, HU J B, et al. Analysis and mitigation of electromechanical oscillations for DFIG wind turbines involved in fast frequency response[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(6):4547-4556.
- [12] PENG X T, YAO W, YAN C, et al. Two-stage variable proportion coefficient based frequency support of grid-connected DFIG-WTs[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(2):962-974.
- [13] RAVANJI M H, CAÑIZARES C A, PARNIANI M. Modeling and control of variable speed wind turbine generators for frequency regulation[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(2):916-927.
- [14] 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.
- [15] 高海淑, 张峰, 丁磊. 风电机组两分段下垂调频控制策略及参数整定方法[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(18):111-121.
- GAO Haishu, ZHANG Feng, DING Lei. Two-segment droop frequency regulation control strategy and parameter setting method for wind turbines[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(18):111-121.
- [16] 朱晓荣, 韩啸. 储能电池与常规机组配合参与一次调频的自适应控制策略[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(9):34-42.
- ZHU Xiaorong, HAN Xiao. The adaptive control strategy of energy storage battery cooperating with conventional generating units to participate in primary frequency regulation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(9):34-42.
- [17] 游文霞, 刘斌, 李世春, 等. 风电并网下的抽水蓄能鲁棒最优调频控制策略[J]. *中国电力*, 2023, 56(5):32-40.
- YOU Wenxia, LIU Bin, LI Shichun, et al. Robust optimal frequency regulation control strategy for pumped storage in grid-connected wind power systems[J]. *Electric Power*, 2023, 56(5):32-40.
- [18] 王鑫, 杨德健. 基于变系数PI控制的双馈风电机组自适应转速恢复策略[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(15):4120-4129.
- WANG Xin, YANG Dejian. Adaptive speed recovery strategy of doubly-fed induction generator based on variable PI control coefficient[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(15):4120-4129.
- [19] VIDYANANDAN K V, SENROY N. Primary frequency regulation by deloaded wind turbines using variable droop[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2):837-846.
- [20] 郝文波, 景菲, 颜庆宇, 等. 数据驱动下基于风电场景的多时间尺度调峰调度研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(16):115-126.
- HAO Wenbo, JING Fei, YAN Qingyu, et al. A multi-time scale peak shaving scheduling strategy based on wind power scenario using a data-driven method[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(16):115-126.
- [21] 季玉琦, 王涛, 史少彧, 等. 含分布式电源的配电网功率优化模式影响因素分析[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(1):97-107.
- JI Yuqi, WANG Tao, SHI Shaoyu, et al. Analysis of influencing factors of power optimization modes in distribution network containing distributed generations[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(1):97-107.

- distribution network considering composite power quality[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*,2022,43(4):52-59.
- [15] YIN Z D,ZHANG J,DONG Y X.Decoupling analysis of additional loss of key equipment in low voltage distribution network under complex power disturbance [C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China: IEEE, 2018:1-6.
- [16] 伊慧娟. 基于最优特征集与改进 KELM 的复合电能质量扰动辨识[D]. 长沙:湖南大学,2021.
YI Huijuan. Identification of compound power quality disturbance based on optimal feature set and improved kernel extreme learning machine[D]. Changsha: Hunan University,2021.
- [17] 韦钢,陈森环,蔡阳,等. 基于瞬时无功率理论的三相不平衡负荷补偿[J]. *电力自动化设备*,2010,30(2):59-63.
WEI Gang, CHEN Senhuan, CAI Yang, et al. Compensation for three-phase unbalanced load based on instantaneous reactive power theory[J]. *Electric Power Automation Equipment*,2010,30(2):59-63.
- [18] ZHENG X Y,WU M,JI Y,et al.Research on influence of distributed generation on distribution network loss and evaluation method[C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing,China.IEEE,2017:1-6.
- [19] 柴乐园,刘一欣,王成山,等. 含不完全量测的分布式光伏发电集群电压协调控制[J]. *中国电机工程学报*,2019,39(8):2202-2212+3.
CHAI Yuanyuan, LIU Yixin, WANG Chengshan, et al. Coordinated voltage control for distributed PVs clusters with incomplete measurements[J]. *Proceedings of the CSEE*,2019,39(8):2202-2212+3.
- [20] 梁志峰,夏俊荣,孙檬檬,等. 数据驱动的配电网分布式光伏承载力评估技术研究[J]. *电网技术*,2020,44(7):2430-2439.
LIANG Zhifeng, XIA Junrong, SUN Mengmeng, et al. Data driven assessment of distributed photovoltaic hosting capacity in distribution network[J]. *Power System Technology*,2020,44(7):2430-2439.
-
- (上接第 176 页 Continued from page 176)
- [22] OBRADOVIĆ D, DIJOKAS M, MISYRIS G S, et al. Frequency dynamics of the northern European AC/DC power system: a look-ahead study[C]//2023 IEEE Belgrade PowerTech.Belgrade,Serbia.IEEE,2023:1.
- [23] 牟澎涛,赵冬梅,王嘉成. 高渗透率风电接入对区域电网小信号稳定性的影响[J]. *电力系统自动化*,2016,40(11):137-142.
MU Pengtao,ZHAO Dongmei,WANG Jiacheng. Impact of high penetration wind power integration on small signal stability of regional power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2016,40(11):137-142.
- [24] 李军军,李圣清,匡洪海. 双馈风电系统参与频率调节的小扰动稳定性分析[J]. *电机与控制学报*,2012,16(8):1-10.
LI Junjun,LI Shengqing,KUANG Honghai. Small signal stability analysis of doubly-fed wind power system participated in frequency regulation[J]. *Electric Machines and Control*,2012,16(8):1-10.
- [25] 张明理,徐建源,李佳珏. 含高渗透率风电的送端系统电网暂态稳定研究[J]. *电网技术*,2013,37(3):740-745.
ZHANG Mingli, XU Jianyuan, LI Jiajue. Research on transient stability of sending power grid containing high proportion of wind power[J]. *Power System Technology*, 2013,37(3):740-745.
- [26] 朱莉. 风电场并网技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2011.
ZHU Li. The technology of interconnecting wind farm with power grid[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2011.
- [27] 张旭,查效兵,岳帅. 基于转子动能控制的DFIG调频能力分析与调频方案[J]. *电力科学与技术学报*,2020,35(3):141-147.
ZHANG Xu, ZHA Xiaobing, YUE Shuai. Frequency regulation capability analysis and regulation plan of doubly-fed induction generator based on the rotor kinetic energy control[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*,2020,35(3):141-147.