

需求响应参与大规模风电接入下的电力系统频率调节研究

包宇庆¹, 李扬¹, 王春宁², 薛璐²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210018; 2. 江苏省电力公司南京供电公司, 江苏 南京 210008)

摘要: 针对大规模风电接入下的电力系统频率稳定控制问题, 研究了需求响应对系统频率的调节作用。为了反映风电的特点, 建立了大规模风电接入下的电力系统频率响应模型, 模型中对风电和火电机组分别进行了建模。风电机组可以通过暂时释放转子动能参与调频, 然而在扰动过大时会导致系统失稳。通过采取一种类似于低压低频减载的需求响应控制方法, 即在频率跌落时关闭部分用电设备, 待频率恢复后将这些设备重新打开, 可以为电力系统调频提供支持。仿真结果表明, 需求响应与风电机组同时参与电力系统调频, 能够克服风电机组的失稳问题, 大大提高风电系统的频率稳定性。

关键词: 电力系统调频; 需求响应; 电网友好型设备; 风电; 转子转速控制

On demand response participating in the frequency control of the grid under high wind penetration

BAO Yuqing¹, LI Yang¹, WANG Chunqing², XUE Lu²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, China; 2. Nanjing Power Supply Company, Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: In view of the frequency control problem caused by high wind penetration, demand response for the frequency control is investigated. In order to reflect the characteristics of wind power, the frequency response model of high wind penetrated power systems is developed, in which wind generators and thermal generators are modeled respectively. The wind generators can participate in frequency control by temporarily release kinetic energy stored in the rotor. However, this control method cannot cope with large disturbances. To support the frequency control, the demand response adopts a control method which is similar to the under frequency load shedding method. That is, some electrical appliances are switched off when the frequency drops; after the frequency restores, these manipulated appliances are switched on again. The simulation results show that demand response in cooperation with wind generators can greatly improve grid frequency stability.

Key words: load frequency control; demand response; grid friendly appliance; wind power; rotor speed control

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)04-0032-06

0 引言

随着越来越多的风电接入电网, 电力系统的频率稳定问题日益突出^[1-4]。在正常情况下, 风电机组工作在最大功率跟踪(MPPT)状态, 风电场尽可能地利用风能, 以最大功率输出。电力系统频率调节的任务主要由电网中其它火电机组完成, 而风机基本上不参与调频。因此, 风电的接入会

使电力系统的频率调节能力下降。与此同时, 风能的随机性会使风机的有功出力随时间不断变化, 从而对电力系统造成扰动, 影响频率稳定。

针对包含风电的电力系统频率控制问题, 国内外学者对风电机组参与电力系统调频进行了一些研究。文献[5]提出了一种依靠转子动能参与电力系统频率调节的方法: 风机在正常运行时, 转子存储了大量的动能; 当电力系统突然发生有功功率缺额导致频率下降时, 转子能够迅速释放动能来提高有功功率输出。这种方法能够有效地应对瞬时性的小扰动^[6-8]。然而转子在释放动能的时候会导致其转速下降, 如果扰动过大, 将可能造成风电机组停机。

基金项目: 国网科技项目《需求侧资源优化运行关键技术研究、装备研制及示范》(2013-1209-6998); 2014年度江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(KYLX-0123)

文献[9]提出了一种风电机组减载控制的方法。在这种控制方式下,风电机组不是运行在最大功率跟踪状态,而是运行在70%~90%最大功率状态。当系统发生有功功率缺额时,能够通过转速控制将风电机组的运行状态迅速向最大功率状态移动,从而实现增加有功出力的目的^[10-12]。这种方式虽然能够较好地实现调频,却浪费了大量的风能,经济性不高。

需求响应为风电接入下的电力系统频率控制提供了一种新方法。通过需求响应,使一部分负荷对电力系统的频率等变化做出响应,在频率跌落时自动切除一部分负荷,可以对电力系统起到调频作用^[13-15]。参与需求响应的设备包括洗衣机、热水器、电冰箱等对连续性供电要求不高电器设备。当电力系统发生有功功率缺额时,这些电器设备能够在短时间内自动关闭电源,帮助电网恢复频率。

近几年来,需求响应消纳风电的能力逐渐得到了国内外学者们的重视^[16-18]。然而鲜有需求响应参与风电系统频率调节的研究报道。针对需求响应参与电力系统的调频的机理和控制策略方面,已有一些研究报道^[19],本文将在此基础上重点研究需求响应对风电系统的频率调节作用。针对风机和火力发电机的特点分别建模,并给出了需求响应的控制策略,在仿真实验中讨论单独采用风机进行调频的频率失稳问题,并通过对比实验验证需求响应参与风电系统调频的有效性与优越性。

1 风电接入下的电力系统频率响应模型

1.1 风机气动模型

风力发电机从自然界捕获的风能与空气密度 ρ 、有效扫风面积 A 、风速 U_w 、桨距角 β 以及风机的叶尖速比 λ 相关,其获得的机械功率可以表示为

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A U_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

其中, $C_p(\lambda, \beta)$ 是风能的功率转换系数,其表达式是关于桨距角 β 和叶尖速比 λ 的函数,针对不同的风机, $C_p(\lambda, \beta)$ 的表达式各不相同,参照文献[12]的表达式, $C_p(\lambda, \beta)$ 可以表示为

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{-\frac{18.4}{\lambda_i}} \\ \lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0.02\beta} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1}} \end{cases}$$

而叶尖速比 λ 表示了风机叶片转速与风速的比值:

$$\lambda = \frac{\omega_r R_w}{U_w} \quad (2)$$

式中, R_w 为风机叶片的半径。

1.2 风力发电机的总体控制策略

变速风力发电机的总体控制策略如图1所示。风力发电机输出的机械功率与桨距角 β ,以及转子转速 ω_r 相关,因此风机从风能中获取的机械功率 P_m 可以通过转速控制或者桨距角控制来实现调节。

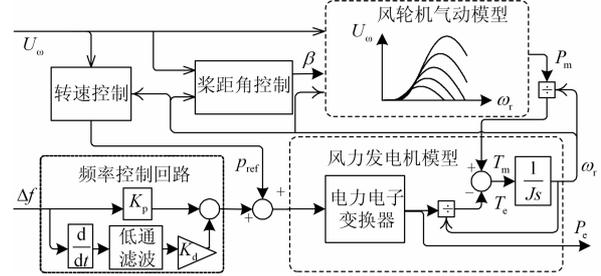


图1 风力发电机的总体控制策略

Fig. 1 General control scheme of wind turbines

风机工作于MPPT状态时, β 取最小值 0° ,从而使风机出力最大。当 β 不变,风机在不同风速以及不同转速下捕获的机械功率 P_m 的曲线如图2所示。当风机工作在最大功率点跟踪状态时,风机在最大功率点处获得的机械功率 P_{opt} 与转子转速 $\omega_{r,opt}$ 满足关系:

$$P_{opt} = k_{opt} \omega_{r,opt}^3 \quad (3)$$

MPPT控制可以通过转速控制模块来实现。将风机输出功率的给定值 P_{ref} 设定为

$$P_{ref} = k_{opt} \omega_r^3 \quad (4)$$

即可实现风能的最大功率跟踪。风力发电机向电网输出的电磁功率 P_e 与机械功率 P_m 满足以下关系式:

$$J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} \cdot \omega_r = P_m - P_e \quad (5)$$

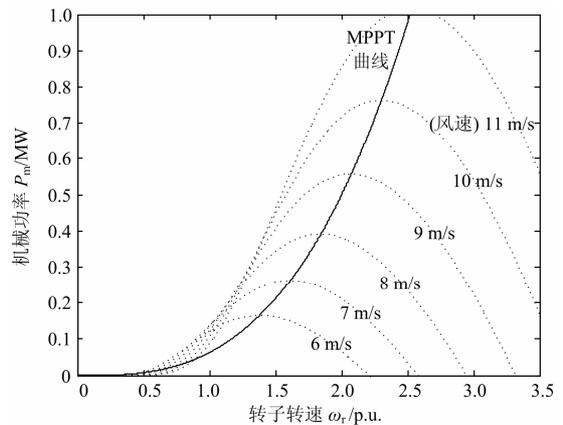


图2 风力发电机捕获的机械功率曲线

Fig. 2 Mechanical power captured by wind turbines

在稳定状态下 $P_e = P_m$,当系统突然发生有功功

率缺额时, P_m 通常无法迅速增加, 而转子却能够通过减速运行在短时间内增大发电机的有功出力 P_e 。通过在频率控制回路引入比例和微分反馈 K_p 和 K_d , 可以使风机对电力系统的频率变化做出响应, 通过暂时释放转子动能对电力系统频率提供支持。

1.3 电力系统频率响应模型

为了研究大规模风电接入下的电力系统频率响应特性, 本文建立的电力系统频率响应模型包含部分风电机组。电力系统频率响应模型如图 3 所示。模型中的火电机组采用的是再热式汽轮发电机组, 图 3 中各参数定义如下: T_g 为调速器时间常数, F_r 为再热系数, T_r 为再热时间常数, T_i 为汽轮机时间常数, R 为调差系数, H 为火电机组转子的惯性常数, D 为负载阻尼系数, K_i 为电力系统二次调频增益, Δf 为频率偏差, P_l 为系统总负荷, P_{DR} 为总负荷中可以提供需求响应的负荷, P'_l 为系统负荷中除 P_{DR} 之外的其它负荷, P_f 为火电机组输出的有功功率, P_w 为风电机组输出的有功功率。由于风电场中包含不止一台风机, 因此 P_w 取(图 1 中) P_e 的倍数, 假设风电场中有 20 台风机, 则 $P_w=20P_e$ 。在后面的仿真中, 火电机组的仿真参数取值如表 1 所示。

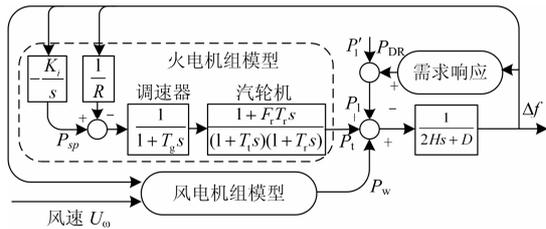


图 3 接大量风电的电力系统频率响应模型

Fig. 3 Frequency response model of power system with wind penetration

表 1 频率响应模型中各参数取值

Table 1 Parameters for the frequency response model

$R=0.05$	$T_g=0.2$	$T_r=7$	$T_i=0.3$
$F_r=0.3$	$H=5$	$D=1$	

2 需求响应控制策略

随着测量技术、通信技术以及计算机技术的发展, 使得通过需求响应参与电力系统调频成为可能。参与需求响应的负荷为洗衣机、蓄热式热水器、电冰箱等可中断供电的电器设备(这些电器设备又称为电网友好型电器设备)。其对电力系统频率的控制通过安装在其外部的智能仪表来实现: 当智能仪表检测电力系统的频率偏差 f 跌落至低于阈值 f_{th} 时, 能够自动切除设备电源, 帮助电力系统恢复频率, 延时 t_{off} 后将设备重新打开^[19-20], 如图 4 所示。

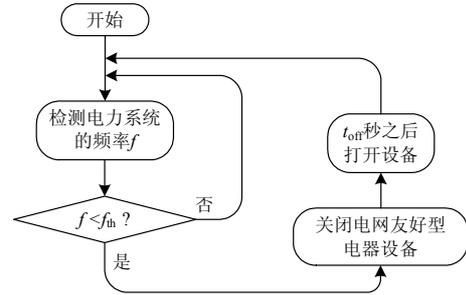


图 4 电网友好型电器设备控制逻辑

Fig. 4 Control logic of grid friendly appliances

相比于低压低频减负荷措施, 参与需求响应的电器设备针对的是可中断供电的电器设备, 其投切不会造成局部停电, 并且基本不会对电力用户造成影响。

与低压低频减载类似, 通过需求响应进行调频也可以采取根据频率变化量来确定切除负荷量的控制方法(例如: 当系统频率低于 49.95 Hz 时, 切除 10% 的需求响应负荷, 当频率低于 49.93 Hz 时切除 20% 的需求响应负荷, 以此类推)。然而与低压低频减载不同, 低频减载通过电力调度对负荷进行集中控制, 而需求响应则是通过分布在各电器设备上的智能仪表来实现, 每一个电器设备智能控制“开”和“关”两种状态。因此可以将用电设备按其重要程度不同分成不同的类型, 各类设备选取不同的 f_{th} 和 t_{off} , 这样可实现类似于低压低频减载的调频效果^[19-20]。本文基于文献[19]的控制策略, 在接下来的仿真中将所有参与需求响应的电器设备按其重要程度分为 10 类, 各类设备的 f_{th} 和 t_{off} 如表 2 所示。

表 2 不同类型的设备选取的 f_{th} 和 t_{off}

Table 2 f_{th} and t_{off} for different categories of grid friendly appliances

类型 (重要等级由低到高)	f_{th}/Hz	t_{off}/s
1	49.95	50
2	49.93	45
3	49.91	40
4	49.89	35
5	49.87	30
6	49.85	25
7	49.83	20
8	49.81	15
9	49.79	10
10	49.77	5

3 仿真实验

在接下来的仿真中, 风电机组的额定功率为 20 台 $\times 1 \text{ MW}$, 火电机组的容量为 50 MW, 风电渗透率约为 29%, 系统中能够提供需求响应的用电设备的

总功率(即 $|P_{DR}|$ 的最大值)默认为2 MW。在接下来的仿真实验中, 本文将分别讨论系统负荷变化及风速变化对系统频率的影响。

3.1 负荷变化

假设风速为恒定10 m/s, 在20 s时刻系统突然发生5 MW的负荷扰动(有功功率缺额), 电力系统的频率 f , 风机转子转速 ω_r , 及动作的需求响应负荷 P_{DR} 的曲线如图5所示。从图5中可以看出, 负荷扰动导致电力系统频率下降。当风机不参与调频时, 电力系统的调频任务完全由系统中的火电机组承担, 电力系统的频率跌落较大, 最大频率跌落达0.57 Hz; 当风机参与调频时, 风机能够通过释放转子动能对系统频率起到调节作用, 从而降低了系统频率跌落, 最大频率跌落为0.40 Hz左右; 风机和需求响应同时参与调频时, 能够有效实现调频, 系统最大频率跌落仅为0.23 Hz左右。

当系统突然发生6 MW的负荷扰动, 仿真结果如图6所示。从图6可以注意到, 当风机参与调频时, 风机转子的动能不足以对补偿6 MW的负荷扰动, 风机的转速迅速下降, 最终导致电力系统失稳; 而风机和需求响应同时参与调频时, 并不会因为扰动的增大而失稳, 在6 MW的负荷扰动下仍能起到很好的调频效果, 最大频率跌落约为0.32 Hz。

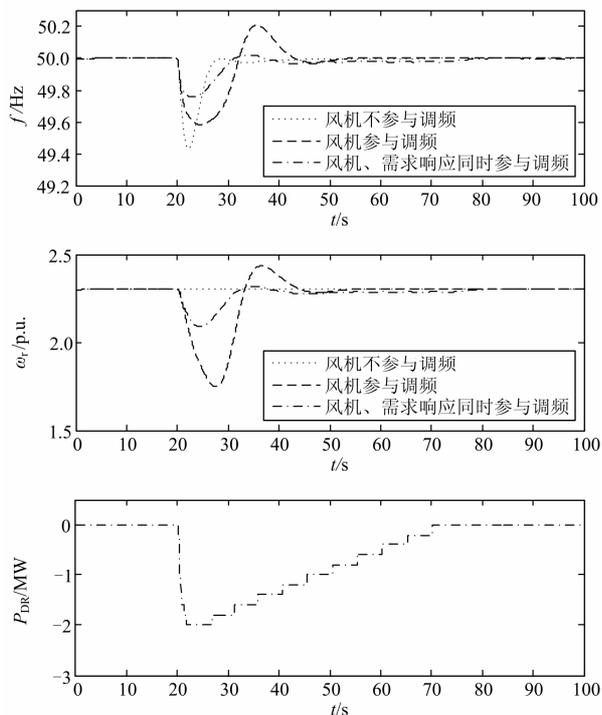


图5 发生5 MW的负荷扰动时系统响应曲线

Fig. 5 Simulation results when there's 5 MW step disturbance in load

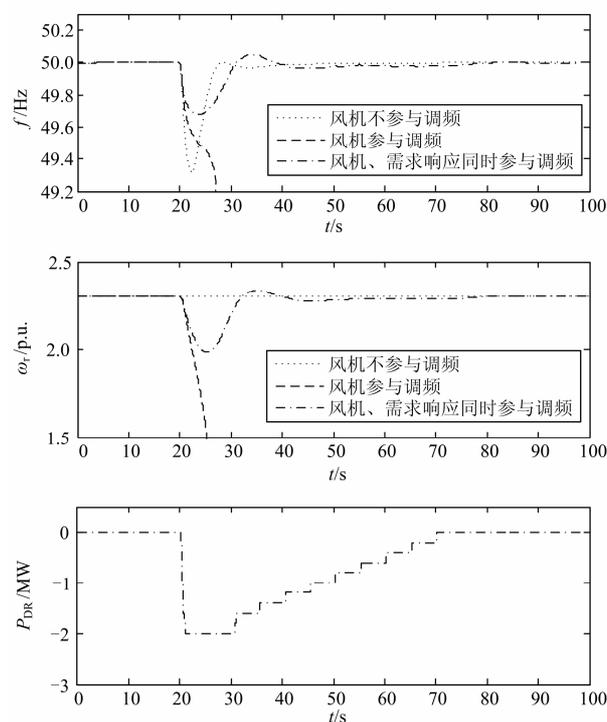


图6 发生6 MW的负荷扰动系统响应曲线

Fig. 6 Simulation results when there's 6 MW step disturbance in load

3.2 风速变化

假设系统总负荷不变, 在20 s时刻风速突然由10 m/s下降至9 m/s, 仿真结果如图7所示。从图7

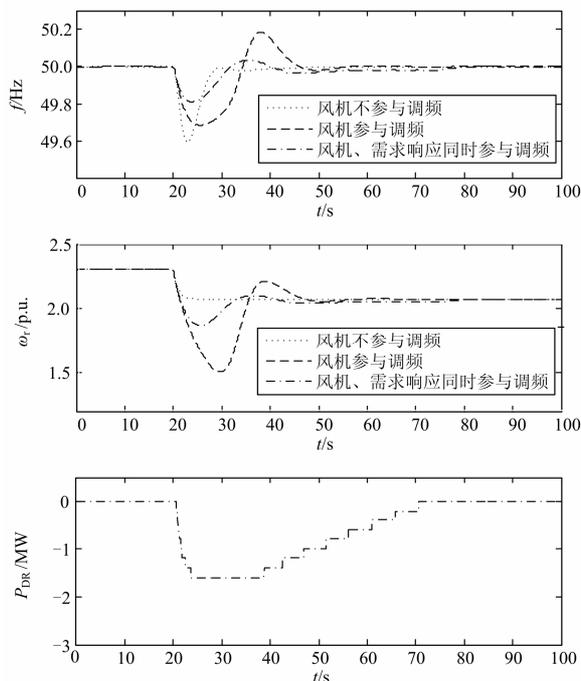


图7 风速由10m/s降至9m/s时系统响应曲线

Fig. 7 Simulation results when U_w changes from 10 m/s to 9 m/s

可以看出, 风速下降导致风机的有功出力下降, 从而导致电力系统频率下降。当风机不参与调频时, 调频任务完全由火电机组承担, 电力系统频率跌落达0.39 Hz; 当风机参与调频时, 风机能够通过暂时释放转子动能进行调频, 最大频率跌落为0.29 Hz左右; 当风机和需求响应同时参与调频时, 系统的最大频率跌落仅为0.18 Hz。

当风速突然由 10 m/s 下降至 8.9 m/s 时, 仿真结果如图 8 所示, 从图中可以看出, 仅采用风机进行调频时, 风机转子的动能不足以克服扰动, 会导致风机的转速迅速下降, 电力系统失稳; 而风机和需求响应同时参与调频时, 并不会导致系统失稳, 在风速迅速降低时最大频率跌落仅为 0.21 Hz。

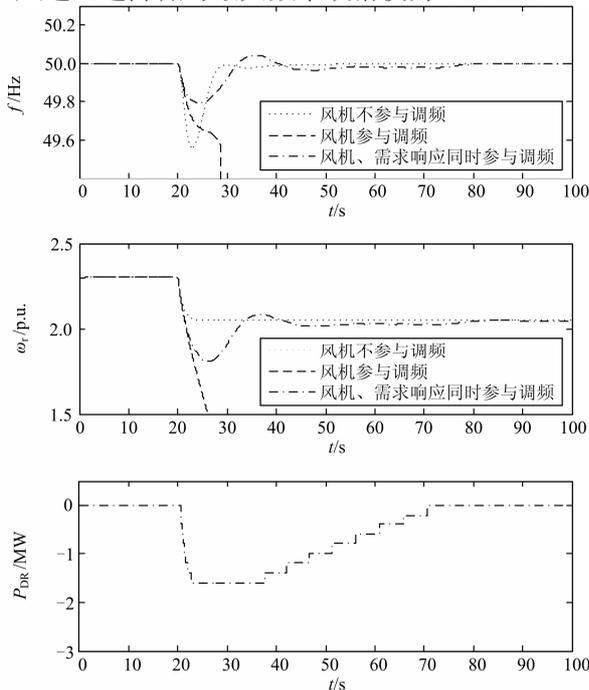


图 8 风速由 10 m/s 降至 8.9 m/s 时系统响应曲线

Fig. 8 Simulation results when U_w changes from 10 m/s to 8.9 m/s

为了观察系统在更大风速变化下, 风机和需求响应同时参与调频的效果, 在接下来的仿真中考虑风速突然由 10 m/s 下降至 8 m/s 时极端情况, 并对分析系统中可用作调频的需求响应负荷总量(即 $|P_{DR}|$ 的上限)为不同值时对控制结果的影响, 仿真结果如图 9 所示。从图中可以看出, 如果系统中可用作调频的需求响应负荷总量不变(仍为 2 MW), 将不能使系统稳定; 但如果将系统中可用作调频的需求响应负荷总量增加到 5 MW, 就能够实现对系统频率的稳定控制。由此可见, 系统的调频能力与系统中可用作调频的需求响应负荷总量有关。为了获得

更大的调频能力, 需要使更多的需求响应负荷参与调频, 从而增加成本。在实际操作中, 应对系统所期望的调频能力以及其成本进行折衷。

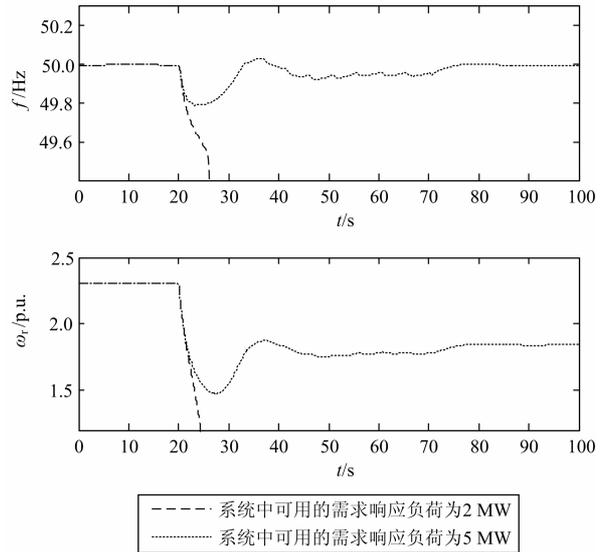


图 9 风速由 10 m/s 降至 8 m/s 时系统响应曲线

Fig. 9 Simulation results when U_w changes from 10 m/s to 8 m/s

4 结论

本文研究了需求响应对大规模风电接入下的电力系统的频率调节作用。

仿真实验中分别研究了在负荷变化时及风速变化时需求响应的频率调节能力。结果表明, 风机可以通过暂时释放转子动能, 对电力系统的频率起到一定的调节作用, 但当扰动过大时会导致系统失稳; 而需求响应可以通过用电设备自身切除其负荷来进行调频, 风机和需求响应同时参与调频时, 比单独采用风机进行调频时具有更好的调频效果。

下一步的研究工作将对控制系统中各参数进行优化。

参考文献

[1] 朱星阳, 张建华, 刘文霞, 等. 风电并网引起电网电压波动的评价方法及应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 88-98.
ZHU Xingyang, ZHANG Jianhua, LIU Wenxia, et al. Evaluation methodology and its application of voltage fluctuation in power network caused by interconnected wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 88-98.

[2] 任博强, 彭鸣鸿, 蒋传文, 等. 计及风电成本的电力系统短期经济调度建模[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 67-72.
REN Boqiang, PENG Minghong, JIANG Chuanwen, et

- al. Short-term economic dispatch of power system modeling considering the cost of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 67-72.
- [3] 谭谨, 王晓茹, 李龙源. 含大规模风电的电力系统小扰动稳定研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 15-23.
- TAN Jin, WANG Xiaoru, LI Longyuan. A survey on small signal stability analysis of power systems with wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 15-23.
- [4] 黄学良, 刘志仁, 祝瑞金, 等. 大容量变速恒频风电机组接入对电网运行的影响分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 142-149.
- HUANG Xueliang, LIU Zhiren, ZHU Ruijin, et al. Impact of power system integrated with large capacity of variable speed constant frequency wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 142-149.
- [5] KEUNG P K, LI P, BANAKAR H, et al. Kinetic energy of wind-turbine generators for system frequency support [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 279-287.
- [6] RUTLEDGE L, MILLER N W, O'SULLIVAN J, et al. Frequency response of power systems with variable speed wind turbines[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 638-691.
- [7] 李军军, 吴政球. 风电参与一次调频的小扰动稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 1-9.
- LI Junjun, WU Zhengqiu. Small signal stability analysis of wind power generation participating in primary frequency regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 1-9.
- [8] MORREN J, DE HAAN S W H, FERREIRA J A. Contribution of DG units to primary frequency control[J]. European Transactions on Electrical Power, 2006, 16(5): 507-521.
- [9] DE ALMEIDA R G, CASTRONUOVO E D, LOPES J A P. Optimum generation control in wind parks when carrying out system operator requests[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 718-725.
- [10] DE ALMEIDA R G, LOPES J A P. Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 944-950.
- [11] 陈宁, 于继来. 兼顾系统调频需求的分布式风电分散自治调控策略[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 123-130.
- CHEN Ning, YU Jilai. Strategy for decentralized autonomous regulation of distributed wind power considering system frequency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(11): 123-130.
- [12] VIDYANANDAN K V, SENROYK N. Primary frequency regulation by deloaded wind turbines using variable droop[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 837-846.
- [13] POURMOUSAVI S A, NEHRIR M H. Real-time central demand response for primary frequency regulation in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1988-1996.
- [14] MOLINA-GARCÍA A, BOUFFARD F, KIRSCHEN D S. Decentralized demand-side contribution to primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 411-419.
- [15] SHORT J A, INFELD D G, FRERIS L L. Stabilization of grid frequency through dynamic demand control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1284-1293.
- [16] MADAENI S H, SIOSHANSI R. Using demand response to improve the emission benefits of wind[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1385-1394.
- [17] 艾欣, 刘晓. 基于需求响应的风电消纳机会约束模型研究[J]. 华北电力大学学报, 2011, 38(3): 17-22.
- AI Xin, LIU Xiao. Chance constrained model for wind power usage based on demand response[J]. Journal of North China Electric Power University, 2011, 38(3): 17-22.
- [18] 程瑜, 董楠, 安甦, 等. 支撑风力发电的需求响应匹配分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 30-34.
- CHENG Yu, DONG Nan, AN Su, et al. Research on demand response matching supporting wind power. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 30-34.
- [19] BAO Yuqing, LI Yang. FPGA-based design of grid friendly appliance controller[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 924-931.
- [20] XU Z, ØSTERGAARD J, TOGEBY M. Demand as frequency controlled reserve[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1062-1071.

收稿日期: 2014-05-28; 修回日期: 2014-08-06

作者简介:

包宇庆(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统建模、电力稳定控制、需求侧管理方面的研究工作; E-mail: 503000747@qq.com

李扬(1961-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力市场和需求侧管理的研究工作。

(编辑 张爱琴)