

A Strategy of Wind Power Participating in System Frequency Regulation Based on RKC and BESS

Jiaying Zhao¹, Wei Gao¹, Mingxia Shanguan¹, Xiaobing Zha², Shuai Yue²

¹Division of the State Grid in Shanxi Province, Taiyuan Shanxi

²School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electrical Power University, Beijing
Email: holmes369@sina.com, 875261882@qq.com, 916578561@qq.com, 2569337513@qq.com, 20116947@cqu.edu.cn, yueshuai8086@163.com

Received: Dec. 3rd, 2016; accepted: Dec. 25th, 2016; published: Dec. 28th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

A large number of wind turbines are connected into power grid by power electronic converter, making wind turbines and the grid decoupling, without the same frequency regulation capability as synchronous generators. In order to improve the frequency regulation capability of wind turbines, a frequency modulation strategy based on rotor kinetic energy control (RKC) and battery energy storage systems (BESS) is proposed. RKC can increase system's inertia and release the rotational kinetic energy in rotors to provide dynamic support for the grid frequency. RKC frequency regulation capacity is restrained by wind speed. Therefore, BESSes with the ability to absorb and release energy quickly can be used to inhibit the frequency fluctuations, reduce system's steady-state frequency deviation and improve the dynamic frequency response. Finally, the control strategy is simulated based on DigSI-LENT/PowerFactory platform, which proves the rationality and effectiveness of the strategy.

Keywords

Wind Power, Frequency Regulation, RKC, BESS, Load Disturbance

基于转子动能控制和蓄电池储能系统共同作用的风电调频策略

赵嘉兴¹, 高伟¹, 上官明霞¹, 查效兵², 岳帅²

文章引用: 赵嘉兴, 高伟, 上官明霞, 查效兵, 岳帅. 基于转子动能控制和蓄电池储能系统共同作用的风电调频策略[J]. 智能电网, 2016, 6(6): 429-438. <http://dx.doi.org/10.12677/sg.2016.66047>

¹国网山西省电力公司科信部, 山西 太原

²华北电力大学电气与电子工程学院, 北京

Email: holmes369@sina.com, 875261882@qq.com, 916578561@qq.com, 2569337513@qq.com, 20116947@cqu.edu.cn, yueshuai8086@163.com

收稿日期: 2016年12月3日; 录用日期: 2016年12月25日; 发布日期: 2016年12月28日

摘要

大量风机采用电力电子变流器的方式并网, 使得风机与系统解耦, 不具有像同步机一样的调频能力。采用转子动能控制增加系统的惯性, 控制转速释放转子中的旋转动能为电网频率提供动态支持。同时引入响应速度快、规模灵活、能量密度大的蓄电池储能系统, 弥补转子动能控制的不足。利用蓄电池储能系统快速吐纳能量的能力, 抑制频率波动, 减小系统的稳态频率偏差, 提高动态频率响应能力。最后, 基于DIGSILENT/PowerFactory平台对该控制策略进行了仿真研究, 验证了该策略的合理性和有效性。

关键词

风力发电, 频率调整, 转子动能控制, 蓄电池储能系统, 负荷扰动

1. 引言

截止到 2015 年底全球风电新增装机容量已达 63.013 GW, 世界风电总装机容量已经突破 430 GW, 电网中风电渗透率不断提高, 给电力系统频率调节带来了新的问题[1] [2]。利用变频器控制的风电机组, 若不附加控制将不能参与系统频率调整; 风电机组通常在最大功率点(Maximum Power Point, MPP)运行, 无法提供有功备用, 不具备像同步机一样的调频能力, 不能保证系统的安全稳定运行[3] [4]。

旋转的风机转子中含有一定的动能, 通过控制转子转速, 适当的释放转子动能能够支持系统频率。在该思想的指导下, 文献[5] [6]提出了虚拟惯性控制策略, 该方法在双馈风力发电机组的有功控制环节中增加一个有功参考信号, 使风机具有一定的惯性响应能力。在此基础上, 文献[7]模拟同步机的一次调频特性, 提出了下垂控制策略, 进一步提高了风机的频率响应能力。由于风速具有波动性, 固定参数的下垂控制系数不能满足风机的需求。针对此问题, 文献[8]提出了根据风速来整定下垂系数的变参数下垂控制策略, 增强了风机的适应性。文献[9] [10]同时将系统频率偏差与频率变化率引入风电机组有功功率控制环, 提出了综合惯性控制方法, 充分发挥了虚拟惯性控制能够抑制频率的快速变化, 下垂控制能够减小最大频率偏差的优势。随着储能技术的快速发展, 储能系统在电力系统中的应用越来越广泛[11] [12] [13]。电池储能系统响应速度快、规模灵活、能量密度大、易维护、寿命长优点, 在电力系统应用很普遍。文献[14]利用电池储能技术平滑风电的输出功率波动, 将间歇式能源变成可调度能源, 实现计划发电, 得到了良好的调峰效果。文献[15]根据电池储能技术特性, 构建了风-储混合电站, 有效地平抑了风功率中的分钟级波动。

转子动能控制响应速度快, 可以减小最大频率偏差, 能够充分发挥风机自身的调频作用, 但是其控制范围有限, 受风速影响较大; 蓄电池储能系统技术成熟、规模灵活、能量密度大, 但是需要增加额外的设备, 运行中频繁的充放电会降低蓄电池的寿命, 不利于经济运行。本文在转子动能控制的基础之上, 利用蓄电池储能技术的快速调节能力弥补风机自身调频能力的不足。通过理论分析, 建立蓄电池储能系统的模型以及相应的控制模型, 使储能系统参与系统频率调节。通过仿真, 可以得出蓄电池储能系统能

够改善系统的频率响应特性，减小最大频率偏差，加快系统频率趋于稳定的速度，在较大的负荷扰动时都可以对系统频率进行支撑。

2. 转子动能控制

转子动能控制的原理是在风电机组的有功功率控制系统中增加一个频率控制环节，实现风机转子中蕴含的旋转动能与电磁功率的相互转换，让该旋转动能参与系统的频率调整，维持系统频率稳定。转子动能控制的具体实现方法主要有虚拟惯性控制、下垂控制以及综合惯性控制。

2.1. 虚拟惯性控制

虚拟惯性控制也被称为惯量控制或者惯性控制，其原理是在风机有功控制部分加入附加控制环节，产生和常规发电机组相似的惯性效应。虚拟惯性控制法所获得的额外有功参考信号 ΔP 可以通过一个与系统频率变化率的正比关系来得到：

$$\Delta P = -K_f \frac{df}{dt} \quad (1)$$

式中， K_f 为比例系数。当系统受到扰动时，虚拟惯性控制可以提供快速的有功输出响应，具体控制实现可参考下图 1 所示。虚拟惯性控制主要用于阻止电力系统暂态过程中频率的快速变化。

2.2. 下垂控制

下垂控制(也称为比例控制、斜率控制)的基本原理为模拟同步发电机一次调频的功-频静态特性曲线，将一个正比于频率偏差的有功功率变化值 ΔP 加入到原有的有功功率参考值上以适时地调节风电机的有功出力，如下式所示：

$$\Delta P = -\frac{1}{R} \Delta f \quad (2)$$

其中 R 是一个常数，风电机组下垂控制的基本控制框图如图 2 所示。

2.3. 综合惯性控制

虚拟惯性控制主要用于阻止电力系统暂态过程中频率的快速变化，下垂控制主要用于减小系统频率偏差。综合惯性控制就是同时将系统频率偏差和频率变化率引入风电机组有功功率控制环，充分发挥两者的优势以增强风机的动态频率响应能力。该方法中额外有功参考值可表示为：

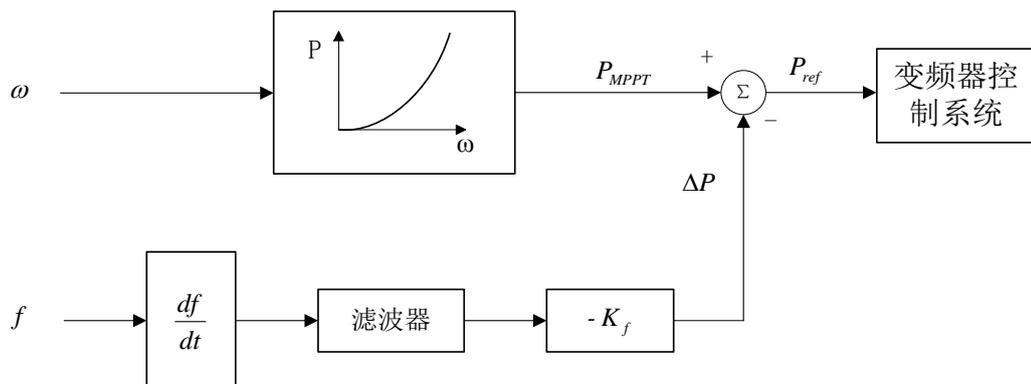


Figure 1. The framework of emulating inertia control
图 1. 虚拟惯性控制框图

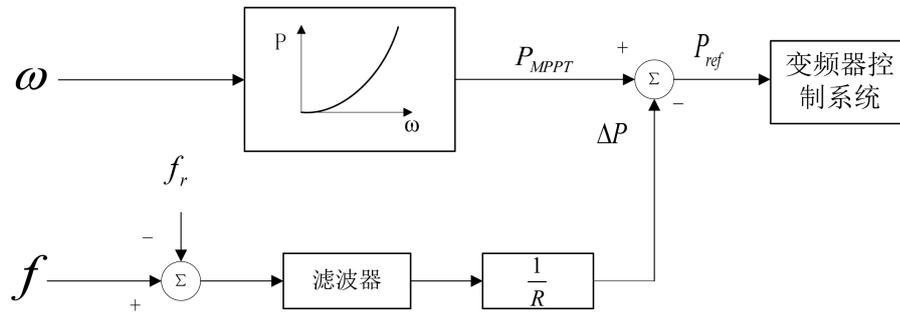


Figure 2. The framework of droop control
图 2. 下垂控制框图

$$\Delta P = K_{df} \frac{df}{dt} - K_{pf} \Delta f \quad (3)$$

其中 K_{df} 、 K_{pf} 分别为虚拟惯性控制系数和下垂控制系数，其控制框图如图 3 所示[16]。第 4 部分所搭建的仿真模型中转子动能控制采用的是该综合控制策略。

3. 蓄电池储能系统

早在 1988 年，美国就在电网中成功安装运行了 40 MWH 的蓄电池储能系统，用于平衡负荷。近年来随着电力电子技术的迅速发展，蓄电池储能技术被广泛应用于电力系统中。电池储能系统响应速度快、规模灵活、能量密度大、易维护、寿命长，因而比传统的调频手段更加的高效，有助于提高电力系统的稳定性。尤其当大量风电并入电网时，电网相对比较薄弱，电池储能技术响应速度快、持续时间长的优势更加明显。

蓄电池储能系统参与电网调频的原理是利用其快速吐纳能量的能力，当负荷减少时把电能储存起来，抑制系统频率的上升；在负荷增加时把储存的电能释放出来，防止系统频率的进一步下跌[17]。蓄电池的模型有很多种，本文采用经典的内阻等值模型：由一个理想的电压源 E_0 和一个等效内阻 r 组成，如图 4 所示。

根据基尔霍夫电压定律得：

$$I = \frac{V_0 - E_0}{r} \quad (4)$$

其中 V_0 为蓄电池的端电压， I 为流过蓄电池的电流。将多个简化的蓄电池经过并、串联后形成蓄电池组，再经过变流器、变压器和线路并入电力系统中，构成蓄电池储能系统，如图 5 所示。

4. 转子动能控制与蓄电池储能系统共同作用的调频策略

转子动能控制的响应能力与转子转速密切相关，可以用下式来表达：

$$\Delta E_k = H(\omega^2 - \omega_{\min}^2) \quad (5)$$

式中 ΔE_k 为风机转子在响应过程中能够提供的动能， ω 为风机运行的转速， ω_{\min} 为风机运行的最小转速， H 为风电机组的惯性时间常数。变速风机转子转速存在极值约束，即 $\omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max}$ ，故转子动能控制的作用有限。从式(5)可以看出低风速时，转子能够释放的动能有限，对系统频率的贡献小；高风速时，转子能够释放较多的动能，对系统频率的贡献大。风速的波动性使得风电机组运行状态具有很大的不确定性。在转子恢复转速的过程中，风电机组的出力将会减少，易导致系统频率发生二次跌落。同时变流器的过载能力、风力机等机械系统的载荷能力都会影响双馈风电机组的惯性响应能力。

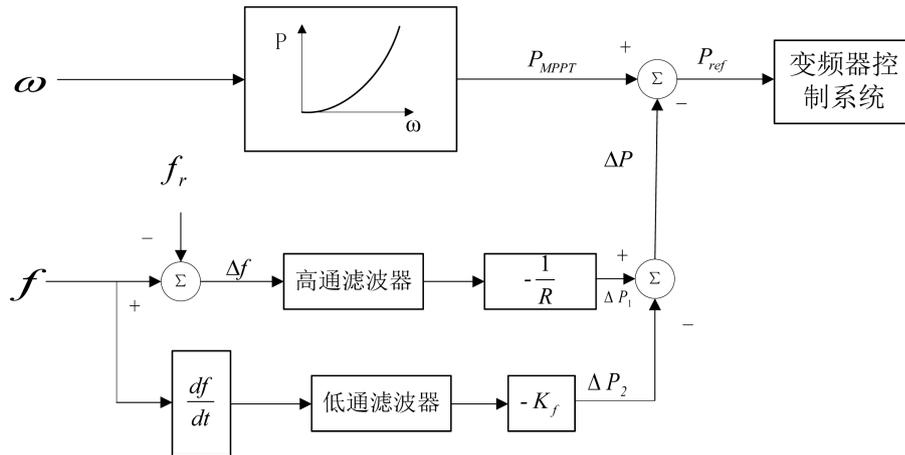


Figure 3. The framework of integrated inertial control
图 3. 综合惯性控制框图

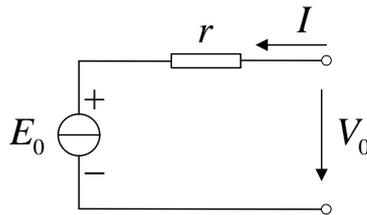


Figure 4. The model of a battery
图 4. 蓄电池模型

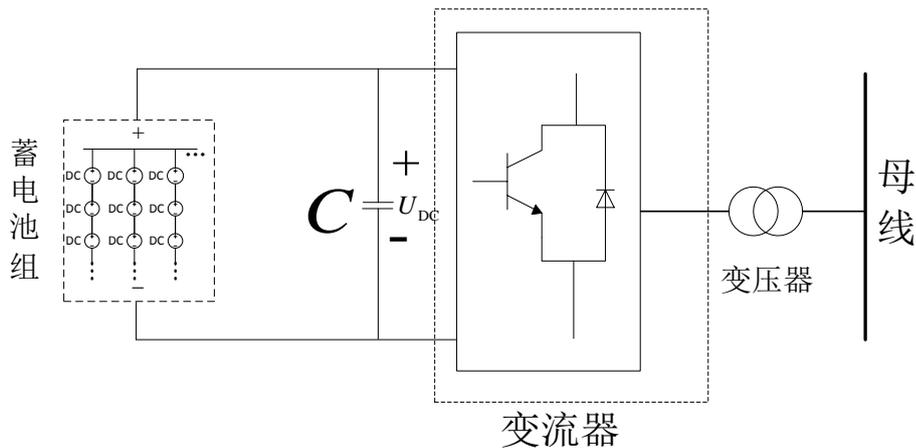


Figure 5. The model of BESS
图 5. 蓄电池储能系统的模型

储能系统快速吐纳能量的能力正好可以弥补转子动能控制在这方面的不足，提高风电系统的响应速度和容量可信度。但是如果储能系统应用的不当，会造成一定的损失，同时会影响风电的发展。长期的接入储能系统会造成储能系统频繁地充放电，这会降低储能系统的寿命。将储能系统与转子动能控制相结合，可以有效的避免这些不利因素的产生。为了充分利用风能并在一定程度上保护储能系统的循环使用寿命，提出基于转子动能和储能系统共同作用的调频策略。

基于转子动能和储能系统共同作用的调频策略在负荷扰动时对频率能够提供的支持如下式(6)所示：

$$\Delta E = \Delta E_k + \Delta E_{\text{bess}} \tag{6}$$

式中 ΔE 为该控制策略作用下能够为系统提供的能量， ΔE_k 为风机转子提供的动能， ΔE_{bess} 为储能系统输出的能量。负荷发生扰动后，风机迅速响应，减小转速释放能量支持系统频率，同时储能系统也将会释放能量，这样会避免风机因转子转速过小而停转。风机转子动能控制 ΔE_k 的调节能力有限，蓄电池储能系统输出 ΔE_{bess} 能够弥补其不足，提高风电系统调频能力。转子动能控制引入了微分控制环节 $\frac{df}{dt}$ ，该环节可以抑制风机的波动，减小对储能系统的影响，对储能系统具有一定的保护作用。参与调频储能系统的配置容量一般是基于系统的调频能力和调频要求，转子动能控制能够提高系统的惯性，不需要提供额外的设备，能够在一定程度上减少储能系统的配置容量，提高风场运行的经济性。

为充分发挥风电机组的作用，转子动能控制采用图 3 所示的综合控制策略。而蓄电池储能系统采用如图 6 所示的控制策略。经测量装置测得并网处的电压，频率，有功和无功功率，经过 PQ 控制模块对蓄电池并网的变流器进行控制，进而参与系统的频率调节。其中的频率控制模块采用与类似于风机的下垂控制策略，如图 7 所示。当频率发生变化时，储能系统的有功参考值发生相应的变化，经过变流器控制后，储能系统相应的输出或者吸收有功，对系统频率进行频率支撑。变流器以储能系统出口处母线输出的有功功率和电压作为控制信号，将其与参考值进行比较后形成控制风电场有功功率、无功功率解耦控制的控制信号，如图 8 所示。其中 P_{in} 、 V_{in} 分别为风电场出口处母线输出的有功功率和电压， P_{ref} 、 V_{ref} 为有功功率参考信号和电压参考信号。 P_{ref} 与参考有功功率 P_{ref} 的差值 dp 经过 PI 调节器产生 d 轴参考电流信号 I_{d_ref} ；实际电压 V_{in} 与参考电压 V_{ref} 的电压偏差 dv 产生 q 轴参考电流信号 I_{q_ref} ，进而对变流器输出的交流电压幅值和相位进行控制，从而控制储能系统输出的有功功率。

5. 仿真案例

5.1. 仿真参数

仿真所采用的是经典的 4 机 2 区域系统，如图 9 所示。该系统含有 11 个节点，风场和储能系统分别经过变压器并入 B_6 号母线上，储能系统的配置容量为 30 MVA，风场为 200 MW(2 MW × 100)，风速

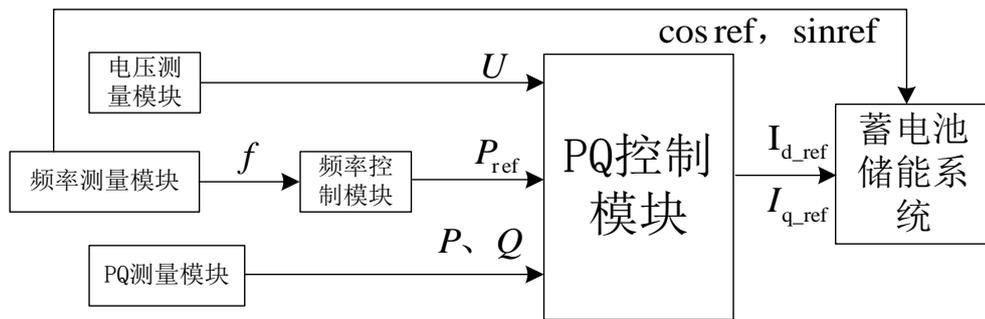


Figure 6. The framework structure of BESS control
图 6. 系统控制框架结构图

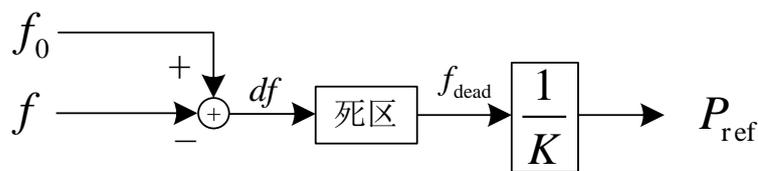


Figure 7. The framework structure of BESS's frequency control
图 7. 储能系统频率控制框图

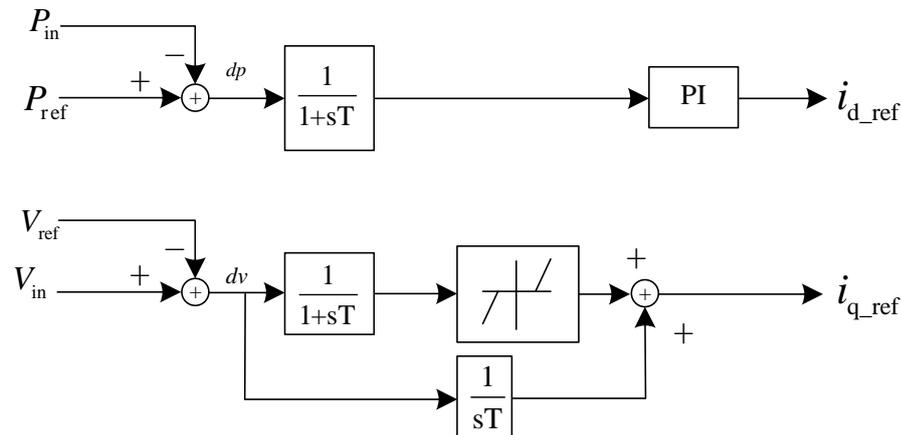


Figure 8. The framework structure of PQ control
图 8. PQ 控制框图

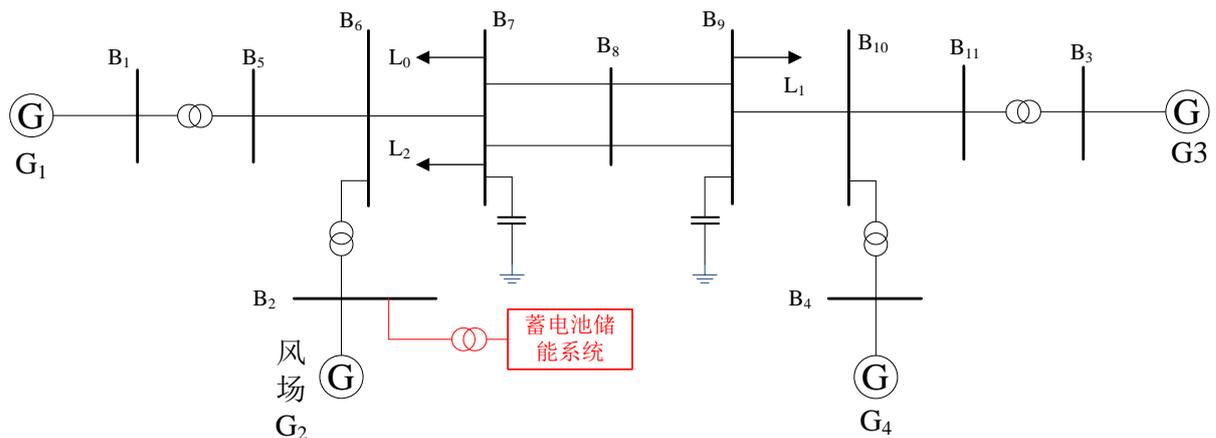


Figure 9. Simulation power system model
图 9. 仿真系统模型

恒为 8 m/s。\$G_1\$、\$G_2\$、\$G_3\$ 的容量均为 800 MW 且配备了调速器和电力系统稳定器。系统负荷 \$L_1\$、\$L_2\$ 大小分别为 1600 MW, 900 MW; \$L_0\$ 为扰动负荷, 扰动大小设置为: 1% (25 MW), 2% (50 MW), 5% (125 MW), 10% (250 MW), 20% (500 MW)。整个仿真过程持续 15 s, 在 5 s 时刻系统负荷发生扰动。仿真对比了无频率控制、转子动能控制、附加储能系统以及二者联合控制的频率响应特性。

5.2. 仿真结果及分析

从图 10 中可以看到利用转子动能控制、附加储能系统以及两者结合的方式均能够改善在较小的负荷扰动时系统频率的动态响应特性。以 10% 的负荷扰动为例, 无控制作用下, 系统的最大频率偏差为 0.3171 Hz, 经过转子动能控制之后, 最大频率偏差为 0.29923 Hz, 提高了 0.01787 Hz; 在储能系统的作用下, 最大频率偏差为 0.28086 Hz, 提升了 0.03624 Hz; 两种控制方式的联合作用下, 最大频率偏差为 0.26066 Hz, 提高了 0.05644 Hz, 见表 1。这说明了转子动能控制联合储能系统控制策略的有效性, 同时证明联合控制能够进一步提升最低点的频率, 减小最大频率偏差, 提高频率稳定性。

从稳态频率的偏差值可以得到, 利用转子动能的控制方式不能够提高稳态的频率偏差, 如表 2 所示。因为在扰动发生后, 风电机组在转子动能控制的作用下, 风机转子减速, 将转子中蕴含的动能转化为

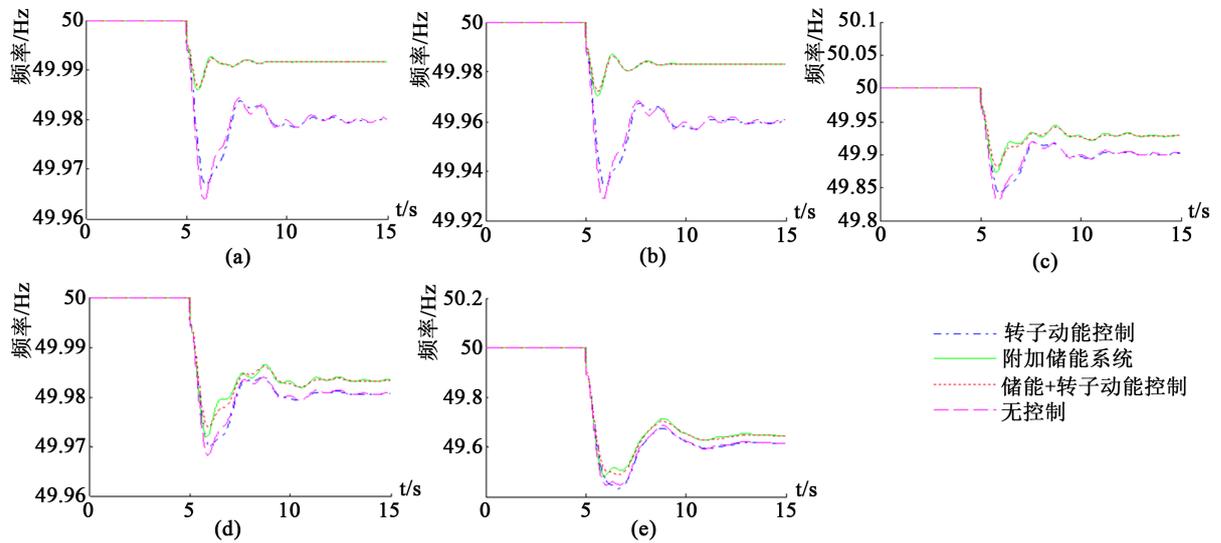


Figure 10. The frequency variation curve of the system under all kinds of load disturbance. (a) 1%; (b) 2%; (c) 5%; (d) 10%; (e) 20%

图 10. 各种负荷扰动下系统的频率变化曲线。(a) 1%; (b) 2%; (c) 5%; (d) 10%; (e) 20%

Table 1. Maximum frequency deviation Δf /Hz

表 1. 最大频率偏差 Δf /Hz

负荷扰动/%	1	2	5	10	20
转子动能控制	0.03332	0.06588	0.15900	0.29923	0.56939
附加储能系统	0.01405	0.02980	0.12691	0.28086	0.51731
储能 + 转子动能控制	0.01351	0.02791	0.11778	0.26066	0.51181
无控制	0.03610	0.07120	0.17062	0.31710	0.55510

Table 2. Steady-state frequency deviation Δf /Hz

表 2. 稳态频率偏差 Δf /Hz

负荷扰动/%	1	2	5	10	20
转子动能控制	0.02015	0.04010	0.09872	0.19229	0.38675
附加储能系统	0.00850	0.01694	0.07141	0.16565	0.35447
储能 + 转子动能控制	0.00850	0.01695	0.07144	0.16588	0.35495
无控制	0.02014	0.04006	0.09873	0.19200	0.38625

电能，增发有功、响应系统频率变化；但在频率的恢复过程中，转子吸收能量恢复原来的转速，转子动能没有发生改变，故不能够提高稳态的频率偏差。储能系统能够对系统提高能量，故其能够提高稳态的频率，减小稳态的频率偏差，其对稳态频率的贡献如下表 3 所示。在 20% 的负荷扰动下，转子动能控制不能提供有效的惯性作用，储能系统的加入很好的弥补转子动能控制在这方面的不足，在较大的负荷扰动下也能够提高系统的惯性响应，改善频率特性。

从最低频率时间可以看出，储能系统具有快速响应的能力，在负荷扰动后能够及时的做出调整，如表 4 所示。转子动能控制相比储能系统而言，其对系统调节速度的改观作用不是非常明显，这是由于其中的微分环节抑制了频率的快速变化，可以利用该微分环节去减小频率的波动。频率曲线图也充分可以体现储能系统能够加快系统的频率趋于稳定，减小频率的波动。

Table 3. The contribution of energy storage system to steady-state frequency**表 3.** 储能系统对稳态频率的贡献

负荷扰动/%	1	2	5	10	20
稳态频率提高值/Hz	0.01164	0.02312	0.02732	0.02635	0.03178

Table 4. The lowest frequency time *t*/s**表 4.** 最低频率时间 *t*/s

负荷扰动/%	1	2	5	10	20
转子动能控制	5.96876	5.96876	5.98376	6.00876	6.65876
附加储能系统	5.56876	5.60876	5.79876	5.84876	5.96876
储能 + 转子动能控制	5.59876	5.61876	5.84876	5.91876	6.67876
无控制	5.87876	5.88876	5.89376	5.90876	6.03876

利用转子动能控制的方式不需要增加额外的设备,节约成本,主要适用于系统中比较小的负荷干扰。适当的配置储能系统,加快系统响应速度,将会大大提高系统的频率响应特性,并且可以使系统在大负荷干扰的情况,能够保持频率稳定。

6. 结论

大规模风电并入电网中,给电力系统频率稳定性带来了巨大的挑战,然而蓄电池储能技术的不断发展给风电参与系统调频带来了福音。本文在转子动能控制风机的基础上,利用蓄电池储能系统的吐纳能量的能力,在系统负荷发生波动的时候对系统频率进行支撑。通过仿真,验证了该方法的有效性,同时得出以下结论:

- 1) 大量风机并网会减小系统惯性,如果不采取任何措施,在较大的负荷扰动下,系统频率会发生较大的偏差,不利于系统频率稳定运行。
- 2) 利用风机自身转子上蕴含的动能,能够改善系统的频率响特性,提高在扰动下的最低频率,但是不能提高稳态的频率偏差。
- 3) 附加储能系统不仅能够提高系统的动态频率响应特性,减小最大频率偏差,同时能够提高稳态频率偏差,增强系统的稳定性。配置合理容量的储能系统,能够在系统在很大负荷扰动下,也能够稳定运行。

资助信息

大规模风电场参与电网动态调频关键技术研究(SGSX0000KXJS[2016]191)。

参考文献 (References)

- [1] 徐涛. 2015 年全球风电装机容量统计[C]. 风能产业, 2016.
- [2] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [3] Lee, K.S., Kim, M.K., Lee, K.S., *et al.* (2014) A Study on Frequency Control and Active Power Control of Wind Turbine Generation System for PMSG. *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, **63**,597-607. <https://doi.org/10.5370/KIEE.2014.63.5.597>
- [4] 唐西胜, 苗福丰, 齐智平, 等. 风力发电的调频技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4304-4314.
- [5] Morren, J., De-Haan, S.W.H., Kling, W.L., *et al.* (2006) Wind Turbines Emulating Inertia and Supporting Primary

- Frequency Control. *IEEE Transactions on Power Systems*, **21**, 433-434. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.861956>
- [6] 田新首, 王伟胜, 迟永宁, 等. 基于双馈风电机组有效储能的变参数虚拟惯量控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 20-26.
- [7] Vidyanandan, K.V. and Senroy, N. (2013) Primary Frequency Regulation by Deloaded Wind Turbines Using Variable Droop. *IEEE Transactions on Power Systems*, **28**, 837-846. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2208233>
- [8] 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.
- [9] 邹贤求, 吴政球, 陈波, 等. 变速恒频双馈风电机组频率控制策略的改进[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(3): 63-68.
- [10] Elitani, S., Annakkage, U.D. and Joos, G. (2011) Short-Term Frequency Support Utilizing Inertial Response of DFIG Wind Turbines. *IEEE Power and Energy Society General Meeting, America*, 24-29 July 2011, 1-8.
- [11] 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.
- [12] 刘世林, 文劲宇, 孙海顺. 适用于风电功率调控的复合储能系统及其控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015(1): 95-102.
- [13] Vidyanandan, K.V. and Senroy, N. (2016) Frequency Regulation in a Wind-Diesel Powered Microgrid Using Flywheels and Fuel Cells. *IET Generation Transmission & Distribution*, **10**, 780-788. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0449>
- [14] 郭园园, 潘文霞, 冯博. 结合风功率预测的电池参与调峰控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 50-53.
- [15] 张新松, 顾菊平, 袁越, 等. 基于电池储能系统的风功率波动平抑策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4752-4760.
- [16] Miao, L., Wen, J.Y., Xie, H.L., *et al.* (2015) Coordinated Control Strategy of Wind Turbine Generator and Energy Storage Equipment for Frequency Support. *Industry Applications Society Meeting, USA*, 18-22 October 2015, 1-7. <https://doi.org/10.1109/tia.2015.2394435>
- [17] 肖硕霜. 带蓄电池储能的风电机组并网控制研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2013.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sg@hanspub.org