

DOI: 10.7652/xjtuxb201812017

运用下垂控制的并网储能系统惯量阻尼特性分析

修连成¹, 熊连松^{2,3}, 康志亮¹, 宋汉梁²

(1. 四川农业大学机电学院, 611130, 成都; 2. 南京工程学院自动化学院, 211167, 南京;

3. 香港理工大学电机工程系, 999077, 香港)

摘要: 为了揭示并网型储能系统的惯量与阻尼特性,缓解分布式能源接入导致的电网稳定性降低的问题,通过构建并网型储能系统的直流电压时间尺度的动态模型,利用静止同步发电机模型,分析了影响并网储能系统惯性效应、阻尼水平以及同步能力的内在机制、主要参数及其影响规律。同时,揭示了下垂控制模式的并网储能系统从物理本质上对应了原动机的下垂控制特征。研究结果表明:DC/DC 变换器使用频率下垂控制策略、并网逆变器使用电压电流双闭环控制策略,通过调节频率控制环和恒压控制环的 PI 参数,即可等效改变储能系统的惯性效应、阻尼水平以及同步能力。研究结果不但可以用于设计有效的并网储能系统控制策略,而且可以辅助提升分布式发电系统的惯性效应、阻尼水平以及同步能力。

关键词: 下垂控制模式;并网储能系统;惯性效应

中图分类号: TM464 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)12-0112-09

Analysis on Dynamic Characteristics of Grid-Tied Energy Storage System with Droop Control

XIU Liancheng¹, XIONG Liansong^{2,3}, KANG Zhiliang¹, SONG Hanliang²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;

2. School of Automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

3. Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: This approach reveals the inertia and damping characteristics of grid-tied energy storage systems for alleviating the reduction of grid stability caused by distributed energy. Focusing on the dynamic of the DC voltage control time-scale, the dynamic model of the grid-tied energy storage system with improved droop control is established, and the static synchronous generator model is used to analyze the influencing factors of inertial level, damping effect and synchronization ability. It is found that the physical nature of the energy storage system is similar to the droop characteristic of the prime mover. The results show that when the DC/DC converter uses the frequency droop control strategy and the grid-tied inverter uses the voltage and current double closed-loop control strategy, adjusting the PI parameters can equivalently change the inertial and damping characteristics of the system. This study may be helpful to design an effective control of grid-tied energy storage system, which enhances the inertia and damping capacity of power grid and improves the stable operation of distributed power system.

Keywords: droop control; energy storage system; inertial level

收稿日期: 2018-05-03。 作者简介: 修连成(1992—),男,硕士生;熊连松(通信作者),男,副研究员。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51707091);南京工程学院高层次人才科研启动基金资助项目(YKJ201613);江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金资助项目(XTCX201711)。

网络出版时间: 2018-08-19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180819.2030.004.html>

近年来,随着电力电子技术的飞速发展,电网中的电力电子装备占比急剧提高,越来越多的电能需要经过变流器处理。与此同时,传统的旋转式同步发电机(RSG)的装机比例逐渐降低,以低惯量、弱阻尼为特征的分布式能源在电网中的比例不断增加,给电网的稳定运行带来了安全隐患^[1-4]。所以,现在的并网变流器系统控制将不能只考虑并网变流器系统自身的稳定性(自稳性),也需要并网逆变器与电网友好互动,在辅助提升电网稳定性的前提下获得自身稳定运行的环境,即必须具备辅助电网稳定运行的能力(致稳性)^[5]。为此,学者们提出利用储能系统来平抑系统功率波动,增强电网的频率稳定性,同时等效地提高电力系统的惯量水平与阻尼能力。

为了充分发挥储能系统稳定电网的性能,现有的致稳性控制策略主要分为频率下垂控制、虚拟惯量控制和虚拟同步发电机(VSG)控制。仿照 RSG 一次调频原理,并网变流器需要频率下垂控制,使并网变流器系统主动响应电网的调频需求。频率下垂控制具有较高的可靠性和灵活性,所以在并网变流器系统控制中获得广泛使用^[6-11]。虚拟惯量控制通常在一次能源供电侧进行控制,而并网变流器采用电压双闭环控制直流侧电容电压^[12-14]。但是,在虚拟惯量控制的作用下,并网变流器的物理特性与现行电网的发电主体 RSG 有着明显的差别,并网变流器依然不具备 RSG 固有的大惯量、强阻尼特性,不能辅助提升电网的稳定性。VSG 控制是基于一次能源调度算法和并网变流器的控制策略,使得并网变流器系统从外特性上模拟 RSG 的大惯量、强阻尼特性^[15-18]。为了响应电网的调频需求,VSG 控制一般不能独立运行,需要增加频率下垂控制环节^[19]。

由于并网储能系统的动态稳定分析涉及系统很多变量,所以文献[20]提出了将系统动态过程的时

间尺度特征划分为交流电流时间尺度、直流电压时间尺度、机械转速时间尺度 3 类来简化问题。其中,直流电压时间尺度动态过程对应于同步机发电系统中的机械时间尺度。文献[21]使用直流电压时间尺度的动态模型,发现下垂控制和 VSG 控制具有相似性,均可等效地模拟惯性效应,但该文献没有对频率下垂控制的并网逆变器系统惯性、阻尼以及同步特性的影响参数及规律进行分析,因此在改善电网惯量、阻尼特性方面仍不能充分利用频率下垂控制。此外,文献[22]提出了静止同步发电机(SSG)模型,分析了电压电流双闭环控制的并网变流器系统的惯性、阻尼以及同步特性。文献[23-24]构建并网变流器的直流电压时间尺度的动态模型,利用 SSG 模型分析了锁相环对并网变流器系统动态特性的影响规律。文献[25]使用 SSG 模型,提出了惯性效应可调的并网变流器系统控制方法。

本文构建了并网储能系统的直流电压时间尺度的动态模型,利用 SSG 模型,分析了下垂控制的储能系统惯性特性、阻尼效应以及同步能力,揭示了影响上述动态特性的内在机制、主要参数及影响规律。本文 DC/DC 变换器使用频率下垂控制策略从物理本质上对应了原动机的下垂控制特征,研究结果将有助于并网储能系统辅助提升电网的稳定性。

1 基于下垂控制模式的并网储能系统

本文以图 1 所示的两级式并网型储能系统为例,分析下垂模式下的储能系统惯量、阻尼特性。该并网储能系统包括储能装置、DC/DC 变换器以及并网逆变器等。其中,DC/DC 变换器工作于下垂控制模式,等效于常规发电机组中的原动机系统,并网逆变器工作于经典的电压电流双闭环控制模式,等效于常规发电机组中的 RSG。 U_b 是储能装置的等效

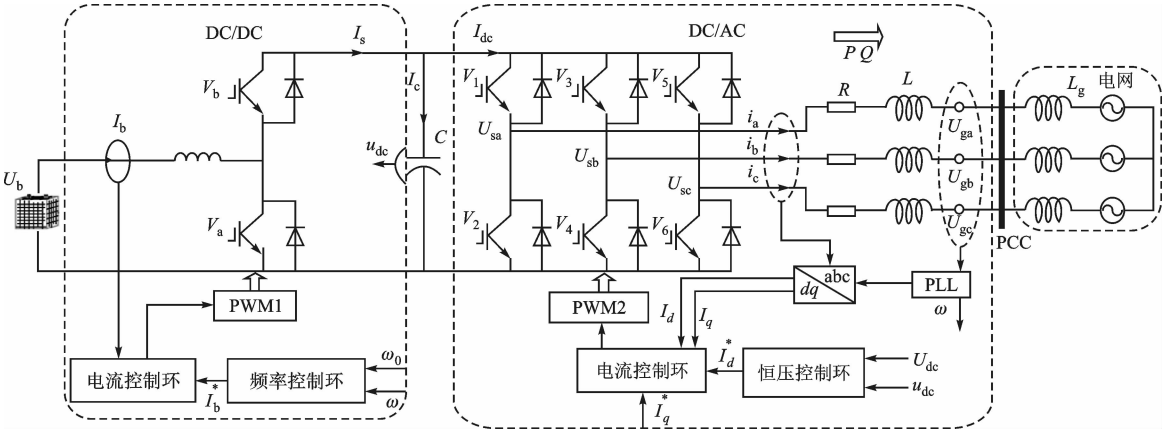


图 1 下垂控制的并网储能系统

输出电压; U_{sk} (k 为 a、b、c) 是并网逆变器机端电压, 对应 SSG 的励磁电势; U_{gk} 是电网侧三相电压; L 、 R 分别是滤波电感和线路电阻; i_k 是并网逆变器输出电流; u_{dc} 是直流电容电压。

1.1 DC/DC 变换器控制策略

在 SSG 模型中, 储能装置可以视作常规发电机组中的一次能源(水力、燃煤、核能), DC/DC 变换器对应于原动机(水轮机或者汽轮机), 并网逆变器对应于旋转式同步发电机 RSG, 直流侧电容对应同步发电机 RSG 的转子部分。因此, 根据 SSG 模型的视角, 图 1 所示的并网储能系统可简化为图 2 所示的简化模型。

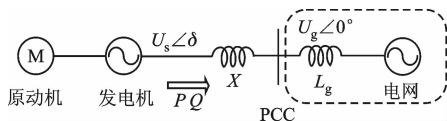


图2 并网储能系统的电路简化图

图2中, 定义并网逆变器的输出电压为 U_s ; δ 是并网储能系统输出电压与电网电压之间的相角差。在忽略等效电阻的前提下, 定义并网储能系统输出阻抗与线路阻抗之和为 X 。本文使用电网电压定向的同步旋转坐标系^[26], 如图3所示。

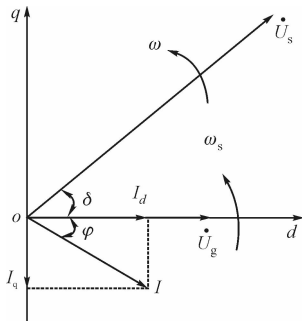


图3 dq坐标系下的矢量图

将电压、电流变换到同步旋转坐标系下, Park 变换矩阵定义为

$$\mathbf{T}_{abc/dq} =$$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (1)$$

则并网储能系统输出的电磁功率和无功功率分别表示为

$$P_e = \frac{3}{2} (U_d I_d + U_q I_q) \quad (2)$$

$$Q = \frac{3}{2} (U_q I_d - U_d I_q) \quad (3)$$

根据图2、式(2)和式(3), 可得并网逆变器输出

的电磁功率、无功功率分别为

$$P_e = \frac{3}{2} \frac{U_s U_g}{X} \sin\delta \approx \frac{3}{2} \frac{U_s U_g}{X} \delta \quad (4)$$

$$Q = \frac{3}{2} \frac{U_s U_g \cos\delta - U_g^2}{X} \approx \frac{3}{2} \frac{U_g (U_s - U_g)}{X} \quad (5)$$

根据式(4)、式(5)可知, 调节 δ 、 U_s 、 U_g 和 X 都可以改变电磁功率 P_e , 而由于无功功率 Q 主要由电压 U_s 决定, 接入电网的电压 U_g 一般为定值, 阻抗 X 为系统的结构参数, 不方便改变, 因此主要通过调节功角 δ 改变电磁功率 P_e 。并网逆变器输出的电磁功率 P_e 和输入功率 P_{in} 成正比关系, 且在稳态时近似相等。显然, 电网在额定角频率 ω_0 下运行时, 功率 P_{in} 输出为额定功率 P_0 。由此可得经典的频率下垂特性曲线如图4所示。

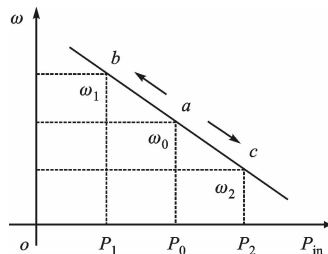


图4 经典频率下垂特性曲线

图4所示的频率下垂控制可描述为

$$\omega = \omega_0 - D_p (P_{in} - P_0) \quad (6)$$

式中: D_p 为频率下垂系数。因此, 并网逆变器的输入功率为

$$P_{in} = \frac{1}{D_p} (\omega_0 - \omega) + P_0 \quad (7)$$

若储能装置的能量足够充足, 那么可参考电力系统的二次调频过程, 利用 DC/DC 变换器的快速响应特性, 实现电网频率的无差控制。根据式(7), 在经典的频率控制环中加入积分控制器, 即可实现并网储能系统的无静差控制, 如图5所示。显然, 图1中的 DC/DC 变换器使用图5所示的频率下垂控制之后, 并网储能系统从物理本质上对应了常规调频机组的下垂控制特性和二次调频特性。

在图5所示的频率外环、电流内环控制策略中, 电流内环的带宽一般远远大于频率下垂外环。对于频率下垂的外环控制过程而言, 电流内环的动态过程在直流电压时间尺度下可以忽略不计, 即

$$I_b^* = I_b \quad (8)$$

因此, 考察直流电压时间尺度的动态过程时, 根据式(8)和控制框图5所示的控制策略, 得

$$I_b = \left(\frac{1}{D_p} + \frac{1}{sD_i} \right) (\omega_0 - \omega) + \frac{P_0}{U_b} \quad (9)$$

式中: D_i 为频率控制环的积分系数。

1.2 并网逆变器控制策略

并网储能系统中的 DC/AC 电路采用电压电流双闭环控制来稳定直流电容电压,如图 6 所示。

恒压控制环的作用是输出指令电流使直流电容电压稳定,电流控制环的作用是按恒压控制环输出的指令电流进行快速跟踪。并网逆变器的恒压控制环采用 PI 控制,在控制策略中引入电压负反馈,实现无差控制。此外,可以根据不同控制目标分别给出无功电流指令。考虑到本文研究的储能系统主要提供有功功率支撑,因此可以令 q 轴电流指令为 0。

同理,在直流电压控制时间尺度下,图 6 所示的控制过程可描述为

$$I_d^* = I_d = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (U_{dc} - u_{dc}) \quad (10)$$

式中: K_p 为恒压控制环比例控制增益; K_i 为恒压控制环积分控制增益。

2 并网储能系统动态特性分析

文献[22]的研究表明:并网逆变器与常规 RSG 具有等效的动态模型、特征参数和能量传递过程,并据此得到了适用于并网逆变器系统动态特性分析的静止同步发电机模型,即 SSG 模型。

根据 SSG 模型可知,并网逆变器直流电压时间尺度的动态过程可用下式描述

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Delta\delta}{dt} &= \Delta\omega \\ 2H \frac{d\Delta\omega}{dt} &= \Delta P_{in} - \Delta P_e \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中

$$H = \frac{CU_{dc}^2}{S_B} \quad (12)$$

仿照电力系统中经典的电气转矩分析模型,式(11)可以改写成下述标准模型

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Delta\delta}{dt} &= \Delta\omega \\ T_J \frac{d\Delta\omega}{dt} &= -T_D \Delta\omega - T_S \Delta\delta \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: T_J 为 SSG 的等效惯性系数; T_D 为 SSG 的等效阻尼系数; T_S 为 SSG 的等效同步系数。

上述 3 个参数分别表征了 SSG 的惯性水平、阻尼效应和同步能力。

本文将基于 SSG 模型的逆变器系统动态分析方法推广到了并网储能系统,并对基于下垂控制模式的并网逆变器系统进行了动态特性分析。

首先,根据图 2、图 3 可知

$$I_d = \frac{U_s}{X} \sin\delta \quad (14)$$

在直流电压时间尺度下,根据式(10)、式(14),可得

$$\frac{U_s}{X} \sin\delta = - \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (U_{dc} - u_{dc}) \quad (15)$$

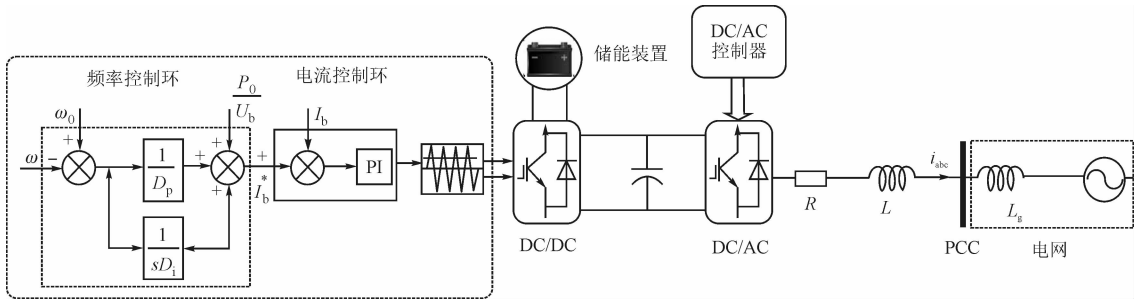


图 5 改进型频率下垂控制框图

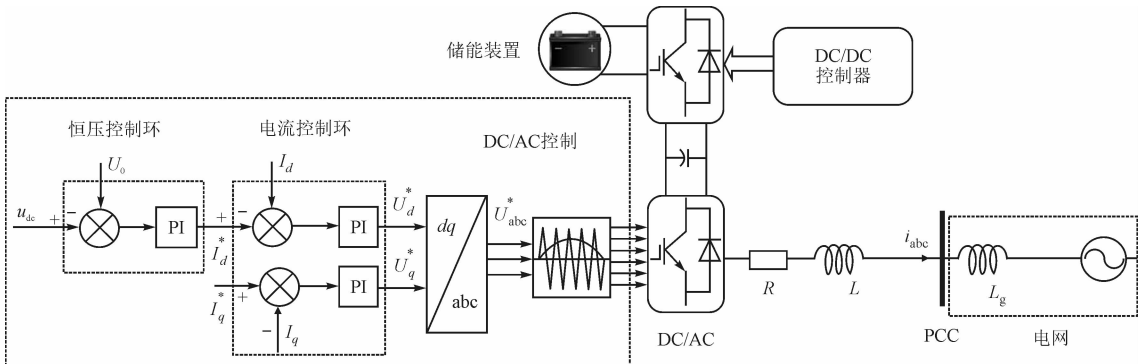


图 6 并网逆变器恒压控制框图

关的组成成分,且该部分仅由系统自身的结构参数和稳态工作点决定。由此说明,并网储能系统天然地自带惯性效应,“储能系统自身不具备惯量效应”这一传统观点是不准确的。

3 仿真验证

本文基于 MATLAB/Simulink 仿真软件来证明下垂控制模式下的并网储能系统模拟惯性效应、阻尼水平和同步能力的有效性。仿真电路的拓扑如图 1 所示,主电路参数如表 1 所示,且电网在 0.3 s 时产生了 10 Hz 的频率变化扰动,使系统经历了一次扰动调整过程。

表 1 并网储能系统的主要电路参数

参数	数值	参数	数值
电网线电压/V	380	交流侧电感/mH	4
直流侧电容/mF	5	电网频率/Hz	60
DC/DC 变换器内环 K_p	0.3	储能装置电压/V	350
DC/DC 变换器内环 K_i	100	逆变器电流内环 K_p	0.1
DC/DC 变换器电感/mH	3	逆变器电流内环 K_i	100

3.1 阻尼特性验证

由式(20)可知,阻尼特性受到频率控制环和恒压控制环的 PI 控制器影响。在仿真实验中,调节 D_i 时,并网储能系统阻尼特性的影响规律见图 8。

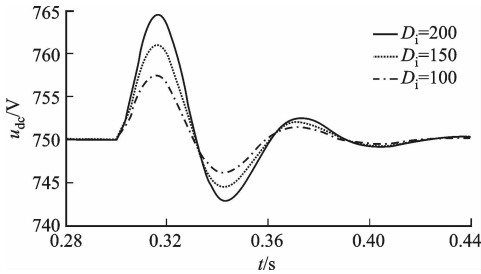


图 8 D_i 对并网储能系统动态参数的影响规律

仿真结果表明:随着 D_i 的增加,直流侧电容电压 u_{dc} 的振荡幅度增大,振荡衰减变慢,即阻尼作用越来越弱,虽然结果中掺杂有同步系数变化的影响,但依然可以看到, D_i 越小并网储能系统对 u_{dc} 振荡的阻尼能力就越强,与式(20)得出的结论一致。由于调节 D_p 、 K_p 、 K_i 都可等效调节阻尼特性,同调节 D_i 结果一致,所以不再赘述。

3.2 惯性特性验证

根据式(20)可知,系统的惯性系数受到 D_p 和 K_p 影响。 D_p 变化对并网储能系统抵御外界扰动的能力如图 9 所示。

仿真结果表明:随着 D_p 的减小, u_{dc} 振荡的幅度

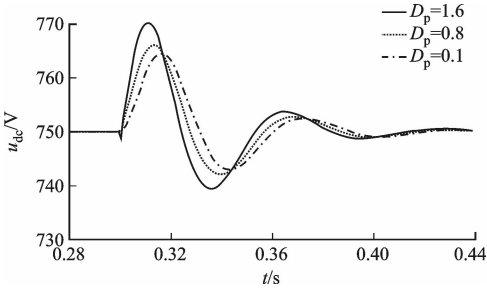


图 9 D_p 对并网储能系统动态参数的影响规律

也减小了,并网储能系统对外部扰动的抵御能力(即惯性能力)增强,虽然有阻尼效应不同的干扰,但是仍然可以观察到, D_p 越小并网储能系统抵御外部扰动的能力就越强,与式(20)得出的结论一致。较高的惯性水平有利于系统直流侧电容电压稳定,避免在外部随机扰动作用下出现直流侧电容电压波动过大,引起频率振荡。

在仿真实验中,调节 K_p 时,并网储能系统抵御外界扰动的能力影响规律如图 10 所示。

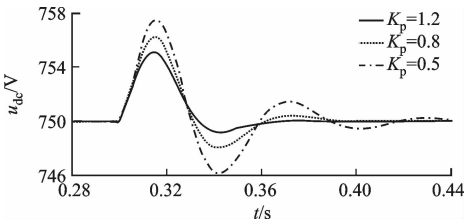


图 10 K_p 对并网储能系统动态参数的影响规律

仿真结果表明:随着 K_p 的增大,振荡回归平衡时间变短, u_{dc} 振荡的幅度减小,并网储能系统对外部扰动的抵御能力增强。仿真结果同时表明, K_p 越大, u_{dc} 的阻尼水平越大。由此可知, D_p 不仅影响储能系统的惯性效应,也影响其阻尼水平。综上所述,当 K_p 值越大时,并网储能系统的惯性水平和阻尼能力就越强,与式(20)得出的结论一致。这表明 D_p 和 K_p 都可以等效调节惯性系数。

3.3 同步特性验证

由式(20)可知,调节 D_i 和 K_i ,即可等效调节同步系数。 K_i 变化对并网储能系统同步水平的影响规律如图 11 所示。

仿真结果表明:随着 K_i 的增大,振荡回归平衡时间变短,并网储能系统对外部扰动的同步能力增强,虽然有阻尼能力不同的干扰,但是仍然可以观察到, K_i 增大并网储能系统同步能力就越强, u_{dc} 越能快速地恢复到稳态值,与式(20)得出的结论一致。图 11 显示,无论 K_i 怎么变化, u_{dc} 的惯性效应几乎不变。由此可知, K_i 几乎不影响系统的惯性效应,

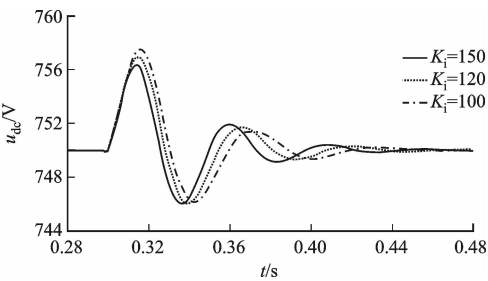


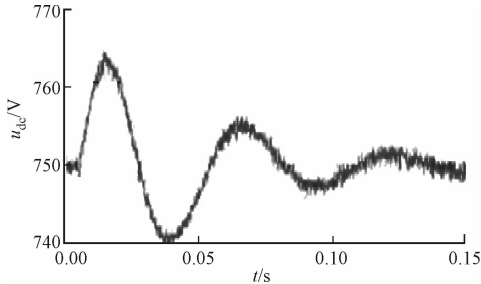
图 11 K_i 对并网储能系统动态参数的影响规律

与式(20)得出的结论一致。调节 D_i 和 K_i ，即可等效调节同步系数，结果与调节 K_i 一致。

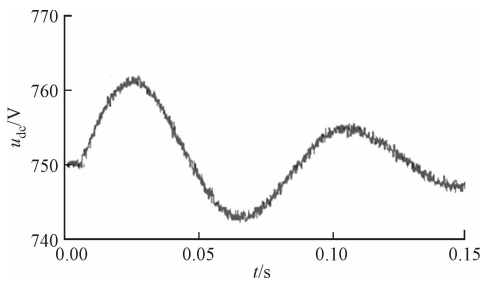
综上所述，在不同的 D_p 、 D_i 、 K_p 和 K_i 参数组合下，虽然 u_{dc} 的动态特性不一致，但最终均能稳定在设定值(750 V)附近，且偏差小于 0.3%。主要原因是，下垂控制环节和恒压控制环节的 PI 控制器为并网储能系统提供了正的阻尼作用、正向的惯性效应和同步能力，因此并网储能系统能保持小干扰稳定。

3.4 仿真验证

本文使用 MATLAB/Simulink 软件对下垂控制模式的并网储能系统建模，导入基于 RT-LAB 的实时仿真平台进行验证。储能系统稳定运行一段时间后，向电网输出的功率为 11 kW，随后电网产生一个 50° 的角变化。图 12 和图 13 为并网储能系统有下垂控制时和无下垂控制时的直流侧电容电压和有功功率对比。显然，有下垂控制时储能系统的 u_{dc} 可以在发生扰动后快速地到达平衡点(750 V)，振荡衰减速度也明显快于无下垂控制时的储能系统。无



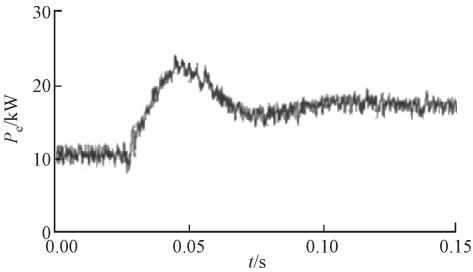
(a) 有下垂控制



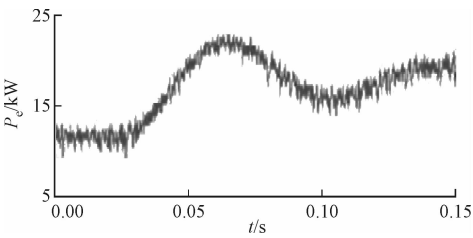
(b) 无下垂控制

图 12 直流侧电容电压波形

下垂控制时，储能系统的有功功率在扰动后振荡衰减较慢，见图 13b，有下垂控制时，储能系统可以较为快速地达到新的平衡点，见图 13a。



(a) 有下垂控制



(b) 无下垂控制

图 13 并网储能系统输出的有功功率

图 14 表示下垂控制的并网储能系统电网电压和并网电流波形。图 15 给出了下垂控制的并网储能系统在功角变化扰动时的频率变化。不难发现，储能系统在一个较大的功角变化后，频率可在两个周期内达到平衡点。结果表明：在参数设计合理的前提下，直流母线电压 u_{dc} 在扰动过后可以快速地稳定在设定值(750 V)；并网储能系统输出也可以快

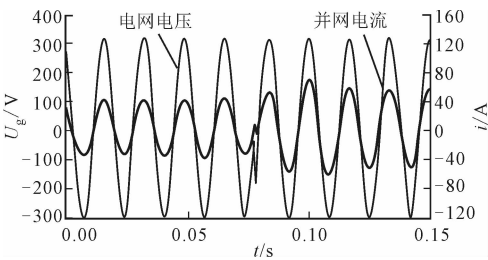


图 14 电网电压和并网电流波形

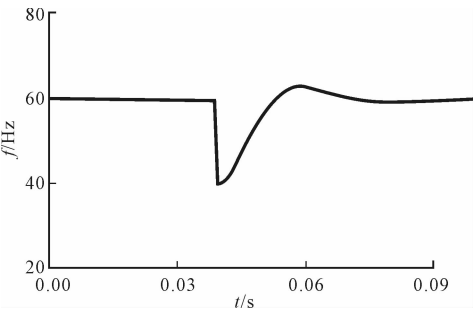


图 15 系统在功角变化扰动时的频率波形

速地稳定在新的稳定点上。综上所述,下垂控制模式可以使并网储能系统快速地到达稳定点。

4 结 论

增强并网储能系统的惯性效应、阻尼水平及同步能力,有利于提高新能源并网发电系统的频率稳定性。本文通过构建并网型储能系统的直流电压时间尺度的动态模型,利用 SSG 模型分析了影响并网储能系统惯性效应和阻尼水平的内在机制、主要参数及其影响规律。研究结果表明:下垂控制模式的并网储能系统的惯量效应、阻尼能力以及同步特性由结构参数、控制参数以及稳态工作点同时决定,且并网储能系统惯性和阻尼效应的主要来源是频率控制环节和电压控制环节。显然,改变频率控制和电压控制中的相关参数就能等效地在线调节储能系统的惯性、阻尼以及同步效应。此外,本文储能系统中的 DC/DC 变换器与常规 RSG 发电系统中的原动机具有对应性,DC/DC 变换器中的频率下垂控制使得并网储能系统具备了常规 RSG 发电系统的一次调频能力。

参考文献:

- [1] 朱蜀,刘开培,秦亮,等. 电力电子化电力系统暂态稳定性分析综述 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 3948-3962.
ZHU Shu, LIU Kaipei, QIN Liang, et al. Analysis of transient stability of power electronics dominated power system: an overview [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 3948-3962.
- [2] 郑天文,陈来军,陈天一,等. 虚拟同步发电机技术及展望 [J]. 电力系统自动化, 2015(21): 165-175.
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015(21): 165-175.
- [3] 索江镭,胡志坚,刘宇凯,等. 大规模光伏发电并网对互联电力系统阻尼特性的影响及其阻尼控制策略 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(2): 99-105.
SUO Jianglei, HU Zhijian, LIU Yukai, et al. Influence of large-scale photovoltaic system integration on damping characteristics of interconnect grid and damping control [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(2): 99-105.
- [4] 别朝红,安佳坤,陈筱中,等. 一种考虑时空分布特性的区域风电功率预测方法 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(10): 68-74.
BIE Zhaohong, AN Jiakun, CHEN Xiaozhong, et al. Regional wind power prediction considering temporal and spatial characteristics [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(10): 68-74.
- [5] 熊连松,卓放,刘小康,等. 静止同步补偿器抑制电网功率振荡的机理研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(12): 112-120.
XIONG Liansong, ZHUO Fang, LIU Xiaokang, et al. Analysis on mechanism of power oscillation mitigation by STATCOM [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(12): 112-120.
- [6] 罗永捷,李耀华,王平,等. 多端柔性直流输电系统直流电压自适应下垂控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2588-2599.
LUO Yongjie, LI Yaohua, WANG Ping, et al. DC voltage adaptive droop control of multi-terminal HVDC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2588-2599.
- [7] 章雷其,黄林彬,黄伟,等. 提高下垂控制逆变器虚拟功角暂态稳定性的控制方法 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 56-62.
ZHANG Leiqi, HUANG Linshan, HUANG Wei, et al. Control methods for improving virtual power angle transient stability of droop-controlled inverters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 56-62.
- [8] BRABANDERE K D, BOLSENS B, KEYBUS J V D, et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1107-1115.
- [9] 郜登科,姜建国,张宇华. 使用电压——相角下垂控制的微电网控制策略设计 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(5): 29-34.
GAO Dengke, JIANG Jianguo, ZHANG Yuhua. Design of microgrid control strategy using voltage amplitude and phase angle droop control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 29-34.
- [10] 耿志清,卓放,宁改娣,等. 孤岛微电网中逆变器并联功率与电压均衡控制技术研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(12): 41-48.
GENG Zhiqing, ZHUO Fand, NING Gaidi, et al. Balanced control strategy for paralleled inverter power and voltage in islanded micro-grid [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(12): 41-48.
- [11] 张德斌,朱纯领,杨高孟. 基于下垂控制并网逆变器改进控制策略的研究 [J]. 电力电子技术, 2015, 49(3): 40-42.
ZHANG Debin, ZHU Chunling, YANG Gaomeng,

- Research on an improved control strategy of inverter based on the droop control [J]. *Power Electronics*, 2015, 49(3): 40-42.
- [12] 侍乔明, 王刚, 马伟明, 等. 直驱永磁风电机组虚拟惯量控制的实验方法研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(8): 2033-2042.
- SHI Qiaoming, WANG Gang, MA Weiming, et al. An experimental study method of D-PMSG with virtual inertia control [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(8): 2033-2042.
- [13] 王刚, 侍乔明, 崔志勇, 等. 一种风力机虚拟惯量控制与传统发电机调速控制的协调方法 [J]. *电网技术*, 2015, 39(10): 2794-2801.
- WANG Gang, SHI Qiaoming, CUI Zhiyong, et al. A coordinated strategy of virtual inertia control of wind turbine and governor control of conventional generator [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(10): 2794-2801.
- [14] 李宇骏, 杨勇, 李颖毅, 等. 提高电力系统惯性水平的风电场和 VSC-HVDC 协同控制策略 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(34): 6021-6031.
- LI Yujun, YANG Yong, LI Yingyi, et al. Coordinated control of wind farms and VSC-HVDC to improve inertia level of power system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(34): 6021-6031.
- [15] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(2): 668-676.
- [16] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia [J]. *IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics*, 2015, 3(2): 451-458.
- [17] 曾正, 邵伟华, 冉立, 等. 虚拟同步发电机的模型及储能单元优化配置 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(13): 22-31.
- ZENG Zheng, SHAO Weihua, RAN Li, et al. Mathematical model and strategic energy storage selection of virtual synchronous generators [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(13): 22-31.
- [18] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 336-348.
- ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 336-348.
- [19] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(16): 2591-2603.
- LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [20] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(19): 5145-5154.
- YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(19): 5145-5154.
- [21] D'ARCO S, SUUL J A. Equivalence of virtual synchronous machines and frequency-droops for converter-based MicroGrids [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(1): 394-395.
- [22] XIONG L, ZHUO F, WANG F, et al. Static synchronous generator model: a new perspective to investigate dynamic characteristics and stability issues of grid-tied PWM inverter [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(9): 6264-6280.
- [23] TAN S, LV Q, GENG H, et al. An equivalent synchronous generator model for current-controlled voltage source converters considering the dynamic of phase-locked-loop [C] // 42nd Annual Conference of the Industrial Electronics Society. Piscataway, NJ, USA: IEEE Computer Society, 2016: 2235-2240.
- [24] TAN S, GENG H, YANG G. Phillips-Heffron model for current-controlled power electronic generation unit [J]. *Journal of Modern Power Systems & Clean Energy*, 2017, 6(5): 1-13.
- [25] 王东杰, 李阳, 熊连松, 等. 基于改进型双闭环控制的并网逆变器惯性模拟方法及其物理机制研究 [J]. *电测与仪表*, 2018, 55(3): 48-54.
- WANG Dongjie, LI Yang, XIONG Liansong, et al. An inertia emulation method based on improved double-loop control for grid-tied inverters [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(3): 48-54.
- [26] 熊连松, 刘小康, 卓放, 等. 光伏发电系统的小信号建模及其控制器参数的全局优化设计方法 [J]. *电网技术*, 2014, 38(5): 1234-1241.
- XIONG Liansong, LIU Xiaokang, ZHUO Fang, et al. Small-signal modeling of photovoltaic power generation system and global optimal design for its controller parameters [J]. *Power System Technology*, 2014, 38(5): 1234-1241.

(编辑 杜秀杰)