

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200629

# 基于二次系统优化的储能变流器惯性提升方法

张兴伟<sup>1</sup>, 谭丽平<sup>1</sup>, 陈文浩<sup>1</sup>, 刘义<sup>1</sup>, 刘明爽<sup>2</sup>

(1. 湖南经研电力设计有限公司, 湖南 长沙 410000; 2. 深圳市欣旺达综合能源服务有限公司, 广东 深圳 518101)

**摘要:** 为了提升储能系统的虚拟惯量, 提高电力系统的稳定性, 针对储能变流器, 给出了一种基于二次系统优化储能变流器惯性提升方法。通过构建完整的状态空间模型, 分析了在不同控制器参数下系统的动态特性, 揭示了虚拟同步机的振荡特性。在此基础上, 设计了基于状态观测器的线性二次型最优控制器, 并对储能电站二次系统进行优化, 在保证交直流系统稳定性的前提下, 弥补了传统虚拟惯性控制器对稳定性的不利影响。基于DIgSILENT/PowerFactory 和 Matlab 的联合仿真验证了所构建状态空间模型的精确性和控制器的有效性。

**关键词:** 储能变流器; 虚拟惯性; 状态观测器; 线性二次型调节器; 最优控制

## Inertial lifting method of an energy storage converter based on secondary system optimization

ZHANG Xingwei<sup>1</sup>, TAN Liping<sup>1</sup>, CHEN Wenhao<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>, LIU Mingshuang<sup>2</sup>

(1. Hunan Jingyan Electric Power Design Co., Ltd., Changsha 410000, China;

2. Shenzhen Sunwoda Integrated Energy Service Co., Ltd., Shenzhen 518101, China)

**Abstract:** In order to improve the virtual inertia of the energy storage and stability of power systems, an inertia lifting method of an energy storage converter based on secondary system optimization is proposed. A complete state space model of the energy storage converter is built, the dynamic performance of system with different controller parameters is analyzed, and oscillation characteristics of the virtual synchronous machine are revealed. Then a linear quadratic optimal controller based on a state observer is designed and the secondary system of the energy storage station is optimized. The method reduces the adverse impacts of a conventional virtual inertia controller on stability. The accuracy of the proposed state space model and the effectiveness of the controller are verified by the co-simulation of DIgSILENT/PowerFactory and Matlab.

This work is supported by the National Key Research & Development Program of China (No. 2017YFB0903400).

**Key words:** energy storage converter; virtual inertia; state observer; linear quadratic regulator; optimal control

## 0 引言

为进一步提升资产利用率, 电网公司提出了变电站、储能站和数据中心站等多站融合的技术发展方向。大量的分布式储能电站能够及时响应调度要求, 提供相应的功率支撑, 成为实现提升电网安全的新技术手段<sup>[1-4]</sup>。

然而, 储能、可再生能源等以电力电子设备进行并网的电源动态与传统同步发电机差异较大。电力电子设备不具备旋转惯性, 在含有高比例可再生能源和储能的电力系统中, 系统的惯性低于以同步发电机为主要电源的传统电力系统<sup>[5]</sup>。低惯性系统易受扰动影响, 尤其是可再生能源引入的随机性使

系统频率波动加剧, 频率稳定性问题突出<sup>[6]</sup>, 并导致电力系统的振荡特性更加复杂<sup>[7]</sup>。近年来, 为提高电力电子化电力系统的惯性, 虚拟同步机控制技术(Virtual Synchronous Generator, VSG)受到了广泛的关注。

VSG最早由Beck和Hesse教授于2007年提出, 称为Virtual Synchronous Machine。该方法在欧洲Virtual Synchronous Control(VSynC)工程中进行了实际应用<sup>[8]</sup>。同时, 比利时鲁汶大学提出了一种电流源型的虚拟同步机控制策略<sup>[9]</sup>, 该方法通过微分控制器对频率进行微分, 进而生成功率参考值的附加量, 从而模拟在系统受扰时同步发电机转子转动动能的释放/吸收。此外, 经典的VSG控制方法还有加拿大Irvani教授提出的设计方案<sup>[10]</sup>和钟庆昌教授提出的Synchronverter<sup>[11-13]</sup>。这两种方法类似,

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0903400)

Synchronverter 相比 Iravani 教授的方法能够更为全面地模拟虚拟同步机的电磁特性。在这些虚拟同步机的基础上, 进一步衍生出多种在微网和配网中应用的虚拟同步机技术。文献[14]通过虚拟惯性控制策略平抑直流母线电压波动。文献[15]研究了虚拟同步机在级联型光伏系统中的应用, 所提出的控制策略能够较好地平抑光伏随机出力产生的功率波动, 并根据电网频率调整输出功率, 提高了光伏系统的并网能力。文献[16]中研究了虚拟惯性系数自适应变化的虚拟同步机控制策略, 基于 bang-bang 控制动态调整控制器的虚拟惯性系数从而提高系统的稳定性。文献[17-19]研究了虚拟同步机的振荡特性, 以及多个虚拟同步机并联运行时的稳定运行问题。文献[20]利用阻抗稳定分析方法揭示了虚拟同步机连接于弱电网时的稳定问题。文献[21]则通过修正虚拟同步机的功率控制环路改善了系统的动态特性。

在大电网中, VSG 同样可以参与调频等工作。文献[12]详细研究了大电网中虚拟同步机控制的频率支撑能力。文献[23]设计了一种适用于高压直流输电系统的虚拟同步机控制, 该方法在传统  $P-f$  下垂控制的基础上增加了一阶惯性环节来模拟虚拟惯性。

面对大规模储能系统接入变电站后, 系统阻尼与惯量的降低, 为了提高储能变流器的惯性, 本文提出基于储能状态观测, 利用虚拟同步机技术, 提升储能变流器惯量。首先分析了储能二次系统架构, 构建了采用传统 VSG 控制的储能变流器系统的状态空间模型, 利用该模型分析了储能变流器的频域特性, 揭示了传统 VSG 对系统动态特性的负面影响。在此基础上, 基于状态观测器(State Observer, SO)的线性二次型最优控制器(Linear Quadratic Regulator, LQR), 设计了储能变流器的附加状态反馈控制器, 同时保证交直流两侧系统的稳定性。本文基于 DIgSILENT/PowerFactory 和 Matlab 的联合仿真验证了本文所提 VSG 控制策略的有效性, 其中, 电网模型构建于 DIgSILENT/PowerFactory 中, SOLQR 控制器构建于 Matlab 中。

## 1 储能系统二次通信系统的架构优化

利用储能系统参与电力系统调峰调频、暂态控制等应用时, 不仅要求储能控制系统的响应速度快, 而且对信息的传输速度与信息精确度等影响因素也有严格要求。按照储能电池信息、集装箱动力环境、储能站控制系统、场站控制系统以及省电力调度中心控制系统等环节, 优化设计改善储能电站通信层级, 结合前述优化目标, 提出优化通信架构, 整个

储能二次系统的架构如图 1 所示, 其中本地储能系统的储能变流器是整个二次系统的直接操纵机构。

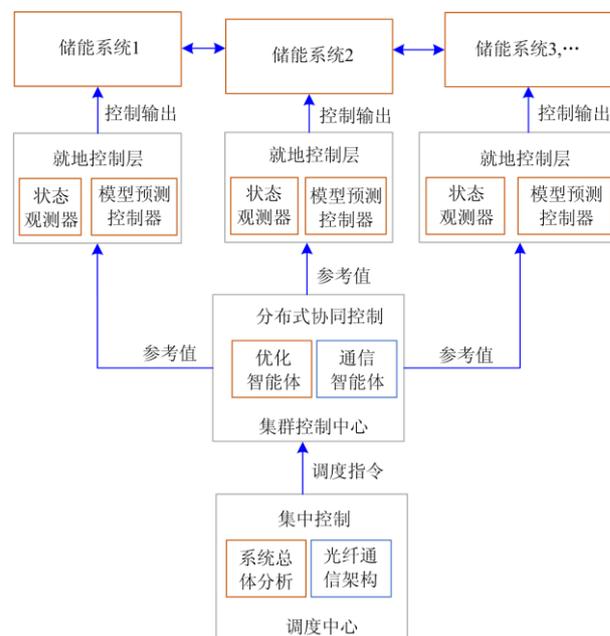


图 1 储能系统的二次结构

Fig. 1 Diagram of the energy storage secondary system

本地储能系统的状态观测对储能系统在整个电力系统中的作用非常关键, 主要体现在: 1) 利用储能参与电力系统调峰调频、暂态控制时, 不仅要求储能系统通信系统的低延时, 而且要求储能控制能够快速准确地响应, 且能够具备强大的故障及扰动穿越能力; 2) 由于储能系统中包含了大量的电池电压和温度等实时非关键量, 只有通过增强储能系统就地的状态观测精度与分析的准确度, 才能实现储能变流器的精准控制, 满足控制要求, 实现控制目标。

当调度指令下发后, 基于图 1 所示的分布与集中相结合的通信架构, 上层负责与已经组网的相邻储能系统进行信息交换, 下层为单个储能系统的自身控制器, 利用状态观测器与模型预测控制器保障储能本体的稳定, 提升储能系统故障时的穿越能力。以变电站中各储能系统为中心, 基于轨迹灵敏度理论和配电网历史运行数据, 计算不同位置储能系统有功及无功出力对各母线电压与频率的控制灵敏度以及有效控制区域, 构建储能系统之间的通信协议, 使之满足即插即用特性。依据分布式协同控制框架, 为保证电网频率及电压稳定, 将储能系统由 PQ 控制切换为 Vf 控制, 根据储能系统在扰动条件下的动态响应特性, 设计控制模式切换方法, 保证系统状态的平滑过渡。

## 2 状态空间模型构建

### 2.1 储能换流器模型

储能变流器的电磁暂态模型能够较为精确地描述电力电子器件的开关动态, 然而其计算量较大, 且本文研究侧重在机电暂态时间尺度, 因此采用动态均值模型(Average-Value Model, AVM)。AVM模型能够较为准确地模拟出变流器的外动态特性, 建模效率和仿真计算速度较高, 适合于电网级的工程应用分析。在直流侧, 变流器等效为受控电流源, 交流侧模型等效为受控电压源, 变流器AVM模型如图2所示。

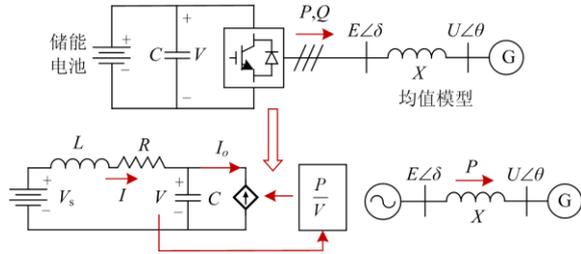


图2 变流器动态均值模型

Fig. 2 Average-value model of converters

忽略变流器的开关损耗, 其输出功率  $P$  等于储能电池的注入功率, 则AVM模型可写为

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = \frac{1}{C}(I - I_o) \\ \frac{dI}{dt} = \frac{1}{L}(V_s - V - RI) \\ I_o = \frac{P}{V} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $R$  和  $L$  为储能电池的等效电阻和电感的等效值;  $V_s$  为储能电池的内电势;  $I$  为储能电池的输出电流;  $I_o$  为注入换流器的电流。

变流器的有功和无功功率输出为

$$\begin{cases} P = \frac{EU}{X} \sin(\delta - \theta) \\ Q = \frac{E[E - U \cos(\delta - \theta)]}{X} \end{cases} \quad (2)$$

### 2.2 等效电网模型

为研究VSC-MTDC系统对交流电网的频率影响, 本章采用调速器的同步发电机等值模型表示交流电网。

$$\begin{cases} \dot{\omega}_g = \frac{1}{2H_g}[P_m + P - P_1 - D_g(\omega_g - \omega_0)] \\ \dot{\theta} = \omega_0 \omega_g \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $H_g$  为同步发电机的转子惯性常数;  $P_m$  为原动机注入的机械功率;  $P_1$  为负荷大小;  $\omega_g$  为交流电网频率量测量;  $\omega_0$  为电网额定角频率;  $D_g$  为发电机阻尼和负荷频率依赖特性。

### 2.3 系统状态空间模型

本文主要研究储能变流器的有功控制环路对系统动态特性的影响, 在传统VSG模型基础上<sup>[15]</sup>考虑式(1)一式(3), 构建系统的状态空间模型如式(4)所示。

$$\begin{cases} \frac{d\Delta x}{dt} = A\Delta x + B\Delta u + B_d\Delta d \\ \Delta y_v = C_v\Delta x \\ \Delta y_\omega = C_\omega\Delta x \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\Delta x$ 、 $\Delta y_v$ 、 $\Delta y_\omega$  和  $\Delta d$  为状态向量、直流电压输出向量、交流频率输出向量和扰动输入向量;  $\Delta x = [\Delta V, \Delta I, \Delta \omega_v, \Delta \omega_g, \Delta z]^T$ ;  $\Delta u = \Delta P_{ref}$ ;  $\Delta d = \Delta P_1$ ;  $\Delta y_v = \Delta V$ ;  $\Delta y_\omega = \Delta \omega_g$ ;  $A$ 、 $B$ 、 $B_d$ 、 $C_v$  和  $C_\omega$  为状态矩阵、控制输入矩阵、扰动输入矩阵、直流电压输出矩阵和交流频率输出矩阵, 具体为

$$A = \begin{bmatrix} \frac{P_0}{CV_0^2} & \frac{1}{C} & 0 & 0 & -\frac{P_{max}}{CV_0} \\ -\frac{1}{L} & -\frac{R}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_\omega + D_v}{2H_v} & 0 & -\frac{P_{max}}{2H_v} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{D_g}{2H_g} & \frac{P_{max}}{2H_g} \\ 0 & 0 & \omega_0 & -\omega_0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2H} & 0 \end{bmatrix}^T; \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2H_v} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T;$$

$$C_v = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; \quad C_\omega = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0].$$

为验证本模型的正确性, 在Matlab中用m代码构建状态空间模型, 在DigSILENT/PowerFactory中构建非线性模型进行对比。设置负荷变化事件, 在  $t=2\text{ s}$  时,  $P_1$  出现 2 MW 的负荷阶跃。系统参数如表1所示, 时域仿真结果如图3所示。

图3中红色实线为PowerFactory的非线性时域仿真结果, 蓝色虚线为Matlab线性模型仿真结果, 其中图3(a)为直流电压曲线, 图3(b)为交流电网频率曲线, 图3(c)和图3(d)分别为图3(a)和图3(b)的放大图。对比可知所构建的状态空间模型具有较好的精度, 可进一步用来进行系统动态分析。

表 1 测试系统参数表

Table 1 Parameters of the test system

变流器	换流站容量/MVA	10
	直流侧额定电压/kV	22
	交流侧额定电压/kV	10
	直流电容/mF	0.75
	等效电阻 $R/\Omega$	0.01
	等效电感 $L/mH$	0.4
VSG	虚拟惯性常数 $H_v/s$	10
	频率下垂系数 $K_\omega/p.u.$	20
	虚拟阻尼系数 $D_v/p.u.$	10
交流电网	惯性常数 $H_g/s$	6.5
	阻尼系数 $D_g/p.u.$	10
	额定容量/MVA	20

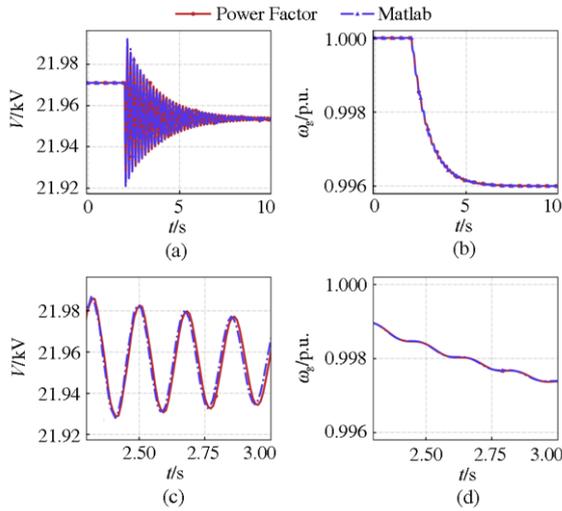


图 3 时域仿真对比图

Fig. 3 Comparison of the time-domain simulations

### 3 储能变流器频域特性分析

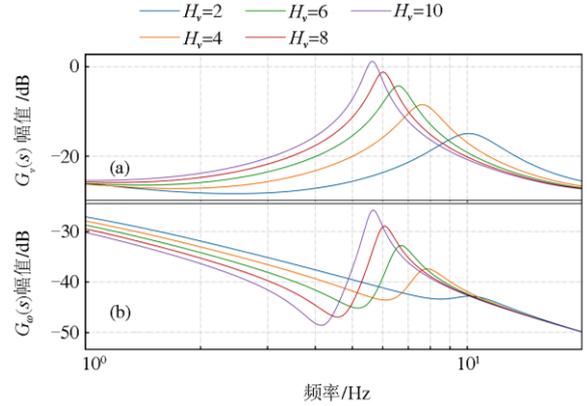
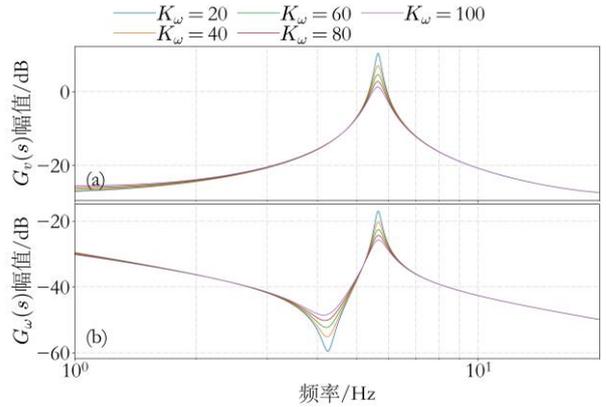
基于前述构建的状态空间模型分析不同 VSG 控制参数下系统的动态特性。

VSG 使电力电子设备具备一定的惯性, 在交流侧发生功率扰动时, 平抑交流系统频率波动, 因此选择模型的扰动输入信号为交流侧负荷扰动  $\Delta P_l$ , 输出信号为变流器直流母线电压  $\Delta V$  和交流系统频率  $\Delta \omega$ 。扰动输入信号到输出信号的传递函数可写为

$$\begin{cases} G_v(s) = C_v(sI - A)^{-1}B_d \\ G_\omega(s) = C_\omega(sI - A)^{-1}B_d \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $G_v(s)$  为负荷扰动到直流电压的传递函数;  $G_\omega(s)$  为负荷扰动到交流系统频率的传递函数;  $I$  为单位矩阵。

通过系统状态空间矩阵中元素  $A(3,3)$  可知, 下垂系数  $K_\omega$  和虚拟阻尼系数  $D_v$  实际作用相同, 因此分析传递函数  $G_v(s)$  和  $G_\omega(s)$  在不同的虚拟惯性常数  $H_v$  和下垂系数  $K_\omega$  的频域响应, 具体结果如图 4 和图 5 所示。

图 4  $H_v$  变化时伯德图Fig. 4 Bode plots with different  $H_v$ 图 5  $K_\omega$  变化时伯德图Fig. 5 Bode plots with different  $K_\omega$ 

由图 4(a) 和图 4(b) 可见, 当  $H_v$  增大时, 变流器直流母线电压的谐振峰迅速增大, 而交流系统频率的低频段偏差降低, 但是其谐振峰同样会增加。直流电压与交流频率的谐振频率都随  $H_v$  增大而降低。可见, 虽然增加虚拟惯性常数  $H_v$  可以在低频段提高交流电网的频率水平, 但是增加了系统的振荡风险。

由图 5(a) 和图 5(b) 可知, 当  $K_\omega$  增加时, 直流母线电压和交流系统频率的谐振峰在一定程度上被抑制, 且不改变谐振频率, 但是其作用有限, 且  $K_\omega$  的设置通常由  $P-\omega$  下垂曲线决定, 涉及到储能系统与交流侧电网在调频时的功率分配问题, 不能随意更改。

通过以上分析可以发现, 传统 VSG 若要提高系统惯性, 必须要增加虚拟惯性常数  $H_v$ , 然而增大该

参数会降低系统的动态性能,激发系统的谐振模式,对稳定性不利。虽然调整下垂系数  $K_o$  可提高系统对谐振模式的阻尼,但效果有限,且  $K_o$  数值受到系统稳态特性的限制,因此传统 VSG 对系统动态特性的负面影响难以通过自身参数设计消除。

#### 4 基于二次系统优化的惯性提升

由上节分析可知,传统 VSG 在调频和动态性能之间存在难以调和的矛盾,本节将在传统 VSG 的基础上,基于状态观测器设计线性二次型最优反馈控制(State observer-based linear quadratic regulator, SOLQR),同时兼顾直流侧和交流侧的动态性能。

##### 4.1 状态观测器设计

状态观测器可由第 2 节所构建的状态空间模型得到

$$\Delta \dot{\tilde{x}} = A\Delta \tilde{x} + B\Delta u + K_e(\Delta y - C\Delta \tilde{x}) \quad (6)$$

式中:  $\Delta \tilde{x}$  为估计的状态向量;  $K_e$  为观测器矩阵;

$$\Delta y = [\Delta V, \Delta \omega]^T, \quad C = [C_v^T, C_\omega^T]^T$$

忽略式(4)中的扰动输入项,将式(4)代入式(6)可得

$$\Delta \dot{\tilde{x}} - A\Delta \tilde{x} = A\Delta x - A\Delta \tilde{x} - K_e(C\Delta x - C\Delta \tilde{x}) = (A - K_e C)(\Delta x - \Delta \tilde{x}) \quad (7)$$

被控对象的状态向量  $\Delta x$  与观测器状态量  $\Delta \tilde{x}$  之差为估计误差,即  $e = \Delta x - \Delta \tilde{x}$ ,代入式(7)中可得估计误差的动态为

$$\dot{e} = (A - K_e C)e \quad (8)$$

由式(9)可知,估计误差的动态特性由矩阵  $(A - K_e C)$  的特征值决定。当  $(A - K_e C)$  的所有特征值的实部均小于 0 时,估计误差最终将趋于 0。当被控对象为完全可观时,可通过极点配置法选择合适的反馈矩阵  $K_e$ ,任意调整矩阵  $(A - K_e C)$  的特征值位置。因此,状态观测器的设计实际是设计反馈矩阵  $K_e$ 。通常来讲,观测器的特征值实部应比被控对象的特征值快 2~5 倍以上。

##### 4.2 线性二次型最优控制器设计

利用状态观测器(8),可通过简化的状态空间模型和量测数据估计实际被控对象的状态。这些估计状态可用来进行反馈控制。为了同时抑制在暂态过程中直流电压和交流系统频率的振荡,采用线性二次型调节器(Linear Quadratic Regulator, LQR)来设计状态反馈控制使二次型目标函数值最小,目标函数可表示为

$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (9)$$

式中:  $Q$  为半正定矩阵;  $R$  为正定矩阵。式(9)中第一项  $x^T Q x$  用来衡量状态量的偏差情况,可通过  $Q$

调节各状态量的权重,第二项  $u^T R u$  用来衡量控制信号所需的能量大小。

状态反馈增益矩阵可选择为

$$K = R^{-1} B^T P \quad (10)$$

式中,  $P$  为正定矩阵,可通过求解 Riccati 方程得到

$$A^T P + P A + Q - P B R^{-1} B^T P = 0 \quad (11)$$

通过式(10)和式(11)得到的状态反馈增益矩阵  $K$ ,可保证储能变流器系统的二次型目标函数值最小,使系统的直流电压和交流侧频率具有较好的动态特性。

完整的控制器框图如图 6 所示。根据原始系统的频率和直流电压量测信息,通过状态观测器估计系统其他状态,并根据二次型最优控制确定的反馈增益矩阵计算合适 VSG 有功功率参考值,从而调整系统的动态特性。

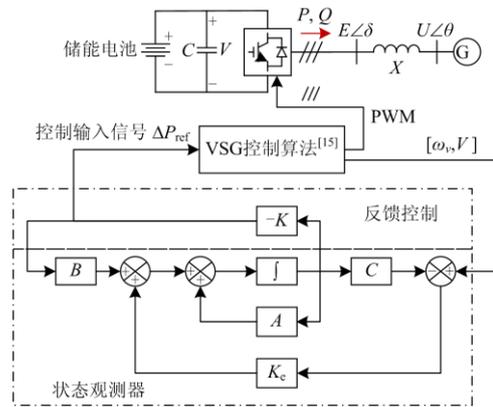


图 6 控制器结构图

Fig. 6 Structure of the proposed controller

## 5 仿真分析

### 5.1 仿真模型介绍

本文在电力系统仿真软件 PowerFactory 中搭建了图 2 所示的储能变流器系统作为被控对象,在 Matlab 中构建 SOLQR,通过 PowerFactory 的 Matlab 接口进行联合仿真,联合仿真的框架如图 7 所示。SOLOR 中矩阵  $Q$  和  $R$  分别设置为:  $Q = \text{diag}(100, 0, 0, 10, 0)$ , 式中,  $\text{diag}$  代表对角矩阵;由于控制输入信号只有 VSG 的  $P_{ref}$ , 因此  $R=100$ 。

为验证所提控制器的有效性,设置了两个仿真案例: 1) 在  $t=2$  s 时,  $P_1$  出现 2 MW 的负荷阶跃扰动; 2) 在  $t=1$  s 时,储能变流器交流侧母线附近出现三相短路故障,  $t=1.1$  s 时故障清除。

### 5.2 仿真案例 1

负荷扰动时,传统 VSG 控制和在 VSG 基础上增加 SOLQR 时的系统响应情况如图 8 和图 9 所示。观测器观测误差如图 10 所示。



图 7 PowerFactory 与 Matlab 联合仿真

Fig. 7 Co-simulation between PowerFactory and Matlab

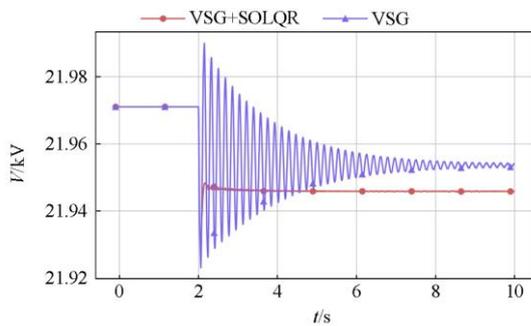


图 8 直流电压响应

Fig. 8 DC voltage response

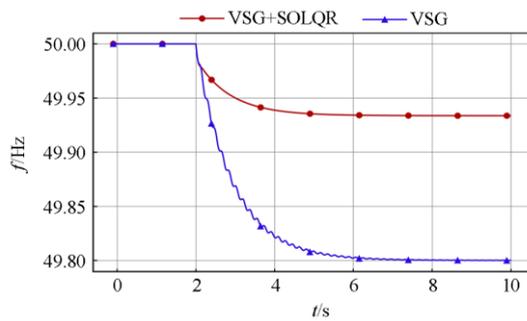


图 9 交流系统频率响应

Fig. 9 Frequency response of the AC grid

由图 8 可见, 只有传统 VSG 控制时, 直流母线电压会受到负荷扰动的严重影响, 出现长时间振荡。在 VSG 基础上增加 SOLQR 控制器后, 储能变流器的直流母线电压稳定性明显增强, VSG 响应负荷侧扰动所导致的直流母线振荡被充分阻尼, 直流系统稳定性增强。

由图 9 可知, VSG+SOLQR 的频率支撑效果要好于传统 VSG, 交流系统频率偏差从 0.2 Hz 减小到了 0.07 Hz, 频率支撑效果显著。虽然导致了直流母线电压偏差增加, 但是偏差不足 0.01%, 直流母线电压的允许偏差范围一般为 5%, 显然在可接收范围内, 而交流频率水平却得到明显提升。

由图 10 可见, 观测器能够较快地跟踪到实际系

统的状态量变化。控制器输出波形如图 11 所示。可见控制器根据交流侧频率偏差和直流电压偏差快速改变了底层 VSG 的功率参考值, 从而快速地抑制频率偏差和直流电压振荡。

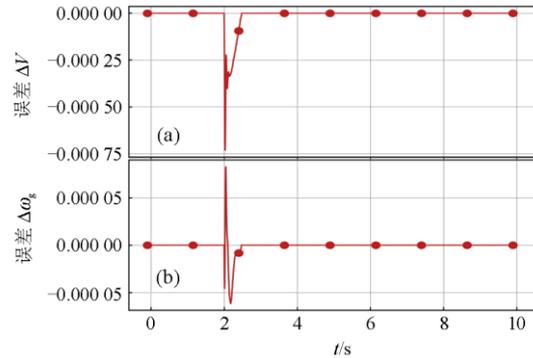


图 10 观测器估计误差

Fig. 10 Error of the state observer

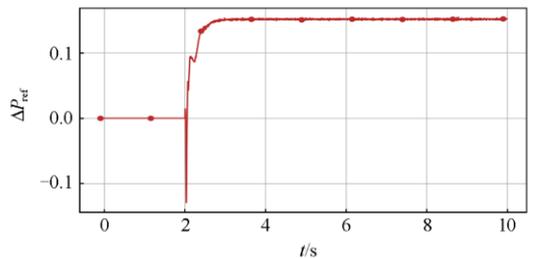


图 11 控制器输出信号

Fig. 11 Control signal of the feedback controller

### 5.3 仿真案例 2

负荷扰动时, 传统 VSG 控制和在 VSG 基础上增加 SOLQR 时的系统响应情况如图 12 和图 13 所示。观测器观测误差如图 14 所示。

由图 12 表明, 当变流器只采用传统 VSG 控制时, 储能变流器交流侧的短路故障导致直流母线电压出现较为严重的振荡, 且持续时间较长。在 VSG 基础上增加 SOLQR 控制器后, 在故障持续期间 (1~1.1 s), 直流母线电压的偏差仍较大, 这是由于

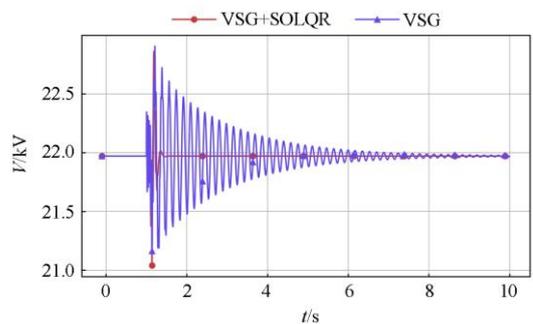


图 12 直流电压响应

Fig. 12 DC voltage response

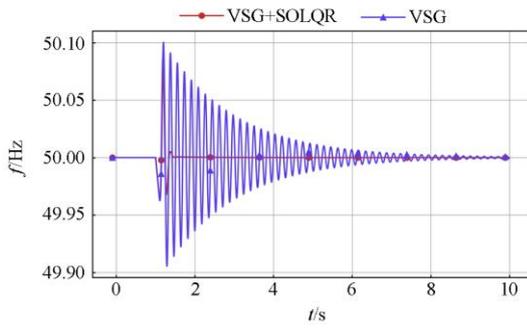


图 13 交流系统频率响应

Fig. 13 Frequency response of the AC grid

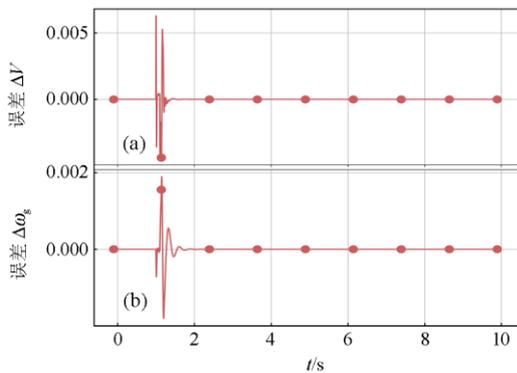


图 14 观测器估计误差

Fig. 14 Error of the state observer

故障期间系统的动态主要由电气特性所决定，控制器作用较小。故障清除后，直流电压在 SOLQR 的控制下迅速恢复到故障前的运行点，稳定性显著增强。

由图 13 可知，在传统 VSG 控制下，交流系统频率同样出现了严重的振荡，而采用变流器采用 VSG+SOLQR 后，系统仅在故障期间出现频率偏移，故障清除后频率迅速恢复至额定运行点，系统稳定性得到增强。

由图 14 可见，观测器能够较为快速地跟踪到暂态过程中实际系统的状态量变化。控制器输出波形如图 15 所示。控制器根据暂态过程中交流侧频率偏

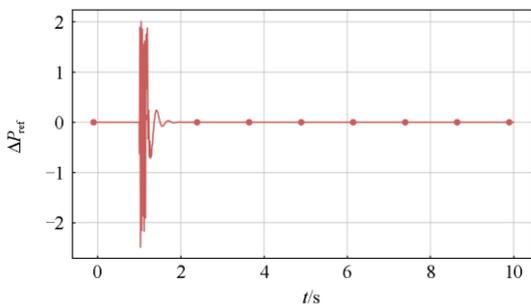


图 15 控制器输出信号

Fig. 15 Control signal of the feedback controller

差和直流电压偏差，快速地调整底层 VSG 的功率参考值，从而保证系统的暂态稳定性。

通过以上两个案例分析可知，所提出的 VSG+SOLQR 控制策略能够有效弥补传统 VSG 的不足，兼顾交直流两侧的系统稳定性。

### 6 结论

本文在优化储能二次系统的基础上，提出了基于状态观测提升储能惯量的方法，采用传统虚拟同步机的储能变流器系统的状态空间模型，分析了其动态特性，利用基于状态观测器的线性二次型最优控制设计了储能变流器的状态反馈控制器，同时保证交直流两侧系统的稳定性。本文的主要结论如下：

1) 储能二次系统的优化对于提升储能本体的惯量特性至关重要，通过增加状态观测，能够有效弥补传统 VSG 的不足，兼顾交直流两侧的系统稳定性。

2) 本文设计的状态观测器考虑了直流电压和交流系统频率，状态反馈控制器能够保证使目标函数最小，交直流两侧系统的稳定性都得到增强。通过仿真验证，系统在负荷扰动和短路故障下都能够对振荡进行有效阻尼，快速过渡至新的稳态运行点。

在本文工作的基础上，未来将进一步研究微网和配网中多虚拟同步机的并联运行问题，包括多储能设备之间以及储能设备与其他新能源设备的交互作用、虚拟同步控制下微网/配网的振荡稳定问题。

### 参考文献

[1] INJETI S K, THUNUGUNTLA V K. Optimal integration of DGs into radial distribution network in the presence of plug-in electric Vehicles to minimize daily active power losses and to improve the voltage profile of the system using bioinspired optimization algorithms[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 21-35. DOI: 10.1186/s41601-019-0149-x.

[2] 李亚楠, 王倩, 宋文峰, 等. 混合储能系统平滑风电出力的变分模态分解-模糊控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 58-65. LI Yanan, WANG Qian, SONG Wenfeng, et al. Variational mode decomposition and fuzzy control strategy of hybrid energy storage for smoothing wind power outputs[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 58-65.

[3] 彭志强, 卜强生, 袁宇波, 等. 电网侧储能电站监控系统体系架构及关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 61-70. PENG Zhiqiang, BU Qiangsheng, YUAN Yubo, et al. Architecture and key technologies of a monitoring and control system for an energy storage power station[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 61-70.

[4] 郝朝辉, 黄慧, 李威, 等. 周期通信对储能系统参与电网调频的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 41-47.

- QIE Zhaohui, HUANG Hui, LI Wei, et al. Analysis of the influence of periodic communication on the participation of energy storage system in power grid frequency modulation[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(1): 41-47.
- [5] 鲁宗相, 叶一达, 郭莉, 等. 电力电子化电力系统的调频挑战与多层级协调控制框架[J]. *中国电力*, 2019, 52(4): 8-17.
- LU Zongxiang, YE Yida, GUO Li, et al. Frequency regulation challenge of power electronics dominated power systems and its new multi-level coordinated control framework[J]. *Electric Power*, 2019, 52(4): 8-17.
- [6] RATNAM K S, PALANISAMY K, YANG G. Future low-inertia power systems: requirements, issues, and solutions-a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 124.
- [7] 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, 5395.
- 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, 5395.
- [8] BECK H P, HESSE R. Virtual synchronous machine[C]// 9th International Conference on IEEE Electrical Power Quality and Utilisation, 2007: 1-6.
- [9] LOIX T. Participation of inverter-connected distributed energy resources in grid voltage control[D]. Leuven: Katholieke Universiteit, 2011.
- [10] GAO F, IRAVANI M R. A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(2): 850-859.
- [11] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [12] ZHONG Q C, NGUYEN, MA Z, et al. Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(2): 617-630.
- [13] 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): 2951-2963.
- LÚ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16): 2951-2963.
- [14] 伍文华, 陈燕东, 罗安, 等. 一种直流微网双向并网变换器虚拟惯性控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 360-371.
- WU Wenhua, CHEN Yandong, LUO An, et al. A virtual inertia control strategy for bidirectional grid-connected converters in DC micro-grids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 360-371.
- [15] 涂春鸣, 兰征, 肖凡, 等. 具备同步电机特性的级联型光伏发电系统[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 433-443.
- TU Chunming, LAN Zheng, XIAO Fan, et al. Study on cascaded H-bridge photovoltaic power systems with synchronous generator characteristics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 433-443.
- [16] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2015, 3(2): 451-458.
- [17] 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.
- [18] HIRASE Y, SUGIMOTO K, SAKIMOTO K, et al. Analysis of resonance in microgrids and effects of system frequency stabilization using a virtual synchronous generator[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2016, 4(4): 1287-1298.
- [19] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Stability assessment and optimization methods for microgrid with multiple VSG units[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(2): 1462-1471.
- [20] ASRARI A, MUSTAFA M, ANSARI M, et al. Impedance analysis of virtual synchronous generator-based vector controlled converters for weak AC grid integration[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 10(3): 1481-1490.
- [21] DONG S, CHEN Y C. Adjusting synchronverter dynamic response speed via damping correction loop[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(2): 608-619.
- [22] 秦晓辉, 苏丽宁, 迟永宁, 等. 大电网中虚拟同步发电机惯量支撑与一次调频功能定位辨析[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(9): 36-43.
- QIN Xiaohui, SU Lining, CHI Yongning, et al. Functional orientation discrimination of inertia support and primary frequency regulation of virtual synchronous generator in large power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(9): 36-43.
- [23] GUAN M, PAN W, ZHANG J, et al. Synchronous generator emulation control strategy for voltage source converter (VSC) stations[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(6): 3093-3101.

收稿日期: 2020-06-05; 修回日期: 2020-07-22

作者简介:

张兴伟(1988—), 男, 本科, 工程师, 主要从事电网工程设计工作; E-mail: zhangxw111@hn.sgcc.com.cn

谭丽平(1978—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事电网工程设计工作; E-mail: tanlip2@hn.sgcc.com.cn

陈文浩(1989—), 男, 本科, 工程师, 主要从事电网工程设计工作。E-mail: chenwh112@hn.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)