

# 孤岛条件下储能系统的鲁棒 LQR 方法研究

杨 旭, 居 荣

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210023)

**[摘要]** 微电网孤岛运行时, 储能系统的主要作用是保持母线电压的稳定. 针对超级电容储能系统运行时存在的超级电容端电压和母线侧负载的参数变化, 导致母线电压发生波动的问题, 提出了一种鲁棒 LQR 控制方法. 首先建立变换器的小信号模型; 其次选定超级电容端电压和母线侧负载作为不确定量, 利用凸优化理论推导储能系统的多胞体模型; 最后用线性矩阵不等式 (LMI) 的方法计算出满足约束条件的 LQR 控制器. 仿真结果表明, 当系统存在参数变化甚至外部干扰时, 该控制方法能够更快、更好地稳定母线电压, 控制效果优于传统的 PI 控制方法.

**[关键词]** 超级电容储能系统, 不确定性问题, 鲁棒 LQR 控制, 多胞体模型, 线性矩阵不等式

**[中图分类号]** TM53 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2019)02-0001-06

## Research on Robust LQR Method for Energy Storage System in Islanding Operation

Yang Xu, Ju Rong

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The main function of the energy storage system is to keep the bus voltage stable when micro-grid is in islanding operation. In view of the change of the system parameters related to super capacitor terminal voltage and bus side load in the operation of the super capacitor energy storage system which causes the fluctuation of bus voltage, a robust LQR control method is presented. Firstly, the small signal model of the converter is established. Secondly, the super capacitor terminal voltage and the bus side load are selected as uncertainties and a multi-cell model of energy storage system is deduced by the theory of convex optimization. Finally, the LQR controller satisfying the constraint condition is calculated by using linear matrix inequality (LMI) method. The simulation results show that the control method proposed in this paper can stabilize the bus voltage faster and better when there are parameter changes or even external disturbances in the system, and that the control effect is superior to the traditional PI control method.

**Key words:** super capacitor energy storage system, uncertainty problem, robust LQR control, multi-cell model, linear matrix inequality

微电网存在两种典型的运行模式, 即并网运行和孤岛运行. 微电网在并网运行时, 储能系统通过调节电网和负荷侧的有功和无功功率以提高电能质量. 微电网在孤岛运行时, 储能系统能够保持微电网电压的稳定<sup>[1]</sup>, 主要体现在保持母线电压的稳定上.

目前, 关于在孤岛模式下储能的控制策略的研究已被关注. 文献[2]在超级电容的储能系统中采用直流母线电压外环、电感电流内环的双 PI 控制策略, 可控制超级电容的充放电, 抑制充放电电流纹波, 实现对母线电压的稳定控制, 同时实现能量的双向传输, 但未考虑系统参数如超级电容端电压和负载变化下的情况. 文献[3]通过功率分频实现了超级电容和锂电池的功率输出优化, 抑制了负载突变时引起的功率波动, 维持了母线电压的稳定, 但同样未考虑超级电容端电压的变化情况. 针对以上研究不足, 本文以超级电容储能系统为例, 选择将系统参数超级电容端电压和母线侧负载作为变化的不确定量, 提出了一种鲁棒线性二次型调节器 (linear quadratic regulator, LQR) 的控制方法. 通过建立变换器的小信号模型<sup>[4]</sup>以及选

取不确定量,利用凸优化理论推导储能系统的多胞体模型,最后用 LMI 的方法计算出满足约束条件的 LQR 控制器<sup>[4-9]</sup>. 此方法有效地解决了在系统参数变化甚至存在外部扰动的情况下,母线电压出现波动的情况,进而达到稳定母线电压的目的.

## 1 双向 DC-DC 变换器建模

首先,对超级电容储能系统中的双向 DC-DC 变换器进行建模. 图 1 是超级电容储能系统结构图. 其中,  $v_i$  为超级电容的端电压;  $v_o$  为母线电压,也即输出电压;  $i$  为超级电容电流;  $L$  为超级电容侧的电感;  $R$  为超级电容内阻与理想电感合并之后的等效电感的阻值;  $R_L$  为母线电压侧的阻性负载;  $C$  为母线侧的电容,用来抑制输出侧的电压纹波. 为了体现能量的双向流动性,在母线侧并联光伏模拟电源  $S$ ,在超级电容放电模式后让  $S$  在某一时刻投入并工作在电流源模式用以给超级电容充电,同时,投入的过程可看成是一个外部扰动.

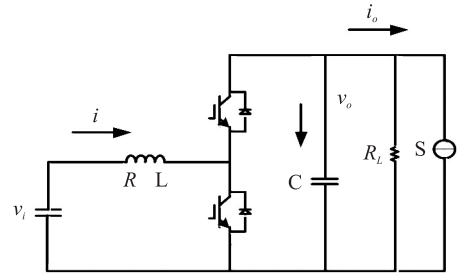


图 1 双向 DC-DC 变换器

Fig. 1 Bidirectional DC-DC converter

图 1 所示的变换器有两种工作方式,分别为独立 PWM 模式和互补 PWM 模式<sup>[7,10]</sup>. 根据本文建模要求,采取互补 PWM 模式,且假设变换器工作在连续导通 (CCM) 状态下,建立双向 DC-DC 变换器的开关周期平均模型:

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = v_i - d \cdot v_o - R \cdot i, \\ C \frac{dv_o}{dt} = d \cdot i - \frac{v_o}{R_L}. \end{cases} \quad (1)$$

在式(1)的基础上加入小信号扰动及线性化之后,经化简得到变换器的小信号模型:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_u u(t), \\ z(t) = C_z x(t). \end{cases} \quad (2)$$

式中,相应的变量为:

$$x(t) = \begin{bmatrix} i(t) \\ v_o(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix}, u(t) = [d_a(t)], z(t) = [v_o(t)], x_3(t) = \int [v_o(t) - v_{0ref}] dt, \quad (3)$$

式中,  $x_3(t)$  加入的目的是使得静态误差为 0;  $v_{0ref}$  表示输出电压的参考值.

各项矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -R/L & -D^{ss}/L \\ D^{ss}/C & -1/R_L \cdot C & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, B_u = \begin{bmatrix} -v_i/D^{ss} \cdot L \\ v_i/(D^{ss})^2 \cdot R_L \cdot C \\ 0 \end{bmatrix}, C_z = [0 \quad 1 \quad 0], \quad (4)$$

式中,  $D^{ss}$  为稳态占空比;  $A$  为状态矩阵;  $B_u$  为控制矩阵;  $C_z$  为输出矩阵.

## 2 储能系统多胞体模型设计

由于超级电容端电压会随着内部能量的变化而变化,同时考虑到母线侧阻性负载的变化,本文将端电压  $v_i$  和负载  $R_L$  考虑作为不确定量. 文献[11]介绍了不确定量通过凸优化理论推导得到多胞体模型的过程,结合电容端电压和负载两个不确定量,定义一组不确定参数  $P^* = [v_i, R_L]$ , 其中:

$$R_L \in [R_{Lmin}, R_{Lmax}], v_i \in [v_{imin}, v_{imax}]. \quad (5)$$

式(2)中的矩阵参数与不确定量  $v_i, R_L$  成线性关系,可以定义一个多胞体的模型. 该多胞体模型中包含了所有不确定矩阵的可能值,其顶点为:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & -R/L & -D_{min}^{ss}/L \\ -D_{min}^{ss}/C & -1/R_{Lmin} \cdot C & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, B_{u1} = \begin{bmatrix} -v_{imin}/D_{min}^{ss} \cdot L \\ v_{imin}/(D_{min}^{ss})^2 \cdot R_{Lmin} \cdot C \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & -R/L & -D_{\min}^{ss}/L \\ -D_{\min}^{ss}/C & -1/R_{L\max} \cdot C & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{u2} = \begin{bmatrix} -v_{i\min}/D_{\min}^{ss} \cdot L \\ v_{i\min}/(D_{\min}^{ss})^2 \cdot R_{L\max} \cdot C \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & -R/L & -D_{\max}^{ss}/L \\ -D_{\max}^{ss}/C & -1/R_{L\max} \cdot C & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{u3} = \begin{bmatrix} -v_{i\max}/D_{\max}^{ss} \cdot L \\ v_{i\max}/(D_{\max}^{ss})^2 \cdot R_{L\max} \cdot C \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0 & -R/L & -D_{\max}^{ss}/L \\ -D_{\max}^{ss}/C & -1/R_{L\min} \cdot C & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{u4} = \begin{bmatrix} -v_{i\max}/D_{\max}^{ss} \cdot L \\ v_{i\max}/(D_{\max}^{ss})^2 \cdot R_{L\min} \cdot C \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

式(6)~(9)是储能系统的多胞体模型,其4个顶点表示一个矩阵空间,其中包含了所有不确定量的模型,该模型可在 LMI 中表示并计算出所需参数。

### 3 基于 LMI 的鲁棒 LQR 控制器设计

#### 3.1 控制框图

本文将不确定量变化对输出电压造成的影响化为 LQR 问题进行优化. 由于 LQR 控制器具有无穷大的幅值裕度和大于  $60^\circ$  的相角裕度,能够保证母线电压具有良好的动态性能. 在图 2 中,  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  是鲁棒 LQR 控制参数。

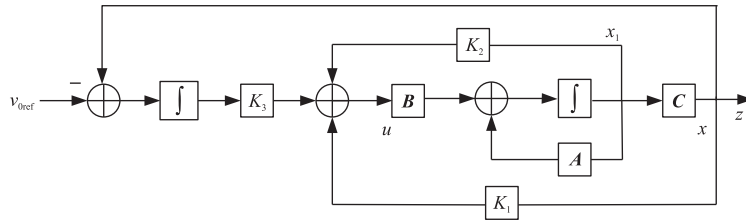


图 2 储能系统鲁棒 LQR 控制框图

Fig. 2 Robust LQR control block diagram of energy storage system

#### 3.2 基于 LMI 的鲁棒 LQR 控制

文献[4]提出了求解 LQR 的一个 LMI 形式,通过 MATLAB 中的 LMI 工具箱可求解得出所需的优化参数. 如式(2)所示的系统,引入状态反馈,设  $u=Kx$ ,求解 LQR 问题可由其关于系统状态和控制输入的二次型性能指标  $J$  最小化得到,其中:

$$J = \int_0^\infty (x' Q_w x + u' R_w u) dt, \quad (10)$$

式中,  $Q_w$  为对称半正定矩阵,表示状态量受控制的精密程度;  $R_w$  为对称正定矩阵,表示控制行为总量. 将  $u=Kx$  代入式(10),可获得闭环 LQR 优化控制器:

$$J = \int_0^\infty x' (Q_w + K' R_w K) x dt. \quad (11)$$

正定矩阵  $P = \int_0^\infty (x' x) dt$ ,  $P$  的作用是保证不确定系统在可能所有值条件下的二次稳定性,  $P$  矩阵需满足以下不等式:

$$(A_i + B_{ui} K) P + P (A_i + B_{ui} K)' + I < 0, \quad i = 1, \dots, 4. \quad (12)$$

式中,  $A_i$ 、 $B_{ui}$  为多胞体模型的系数矩阵。

用矩阵的迹操作符号  $\text{tr}(\cdot)$  化简式(11)可得:

$$J = \int_0^\infty \text{tr}((Q_w + K' R_w K) x' x) dt = \text{tr}((Q_w + K' R_w K) P). \quad (13)$$

式(13)成立,则闭环系统是一不确定性系统. 结合 Lyapunov 理论推导出不确定性系统的二次稳定性,并用 LMI 进行描述,最后利用在计算机中已实现的凸优化方法求解出正定矩阵  $P$ ,从而保证了不确定性系统的稳定性,即所有轨迹收敛至零。

于是闭环优化参数  $K$  可由式(14)得到:

$$\begin{aligned} \min_{P,K} \operatorname{tr}(\mathbf{Q}_w \mathbf{P}) + \operatorname{tr}(\mathbf{R}_w^{1/2} \mathbf{K} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{K}' \mathbf{R}_w^{1/2}), \\ \text{s.t. } (\mathbf{A}_i + \mathbf{B}_{ui} \mathbf{K}) \mathbf{P} + \mathbf{P} (\mathbf{A}_i + \mathbf{B}_{ui} \mathbf{K})' + \mathbf{I} < 0, \quad i = 1, \dots, 4. \end{aligned} \quad (14)$$

由于式(14)中涉及到  $\mathbf{P}$  和  $\mathbf{K}$  相乘,故式(13)是非线性的. 文献[12]提出引入新变量来解决这一问题,设新变量  $\mathbf{Y} = \mathbf{K} \mathbf{P}$ ,则式(14)可改写为:

$$\begin{aligned} \min_{P,Y} \operatorname{tr}(\mathbf{Q}_w \mathbf{P}) + \operatorname{tr}(\mathbf{R}_w^{1/2} \mathbf{Y} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{Y}' \mathbf{R}_w^{1/2}), \\ \text{s.t. } (\mathbf{A}_i + \mathbf{B}_{ui} \mathbf{K}) \mathbf{P} + \mathbf{P} (\mathbf{A}_i + \mathbf{B}_{ui} \mathbf{K})' + \mathbf{I} < 0, \quad i = 1, \dots, 4. \end{aligned} \quad (15)$$

为简化非线性部分  $\operatorname{tr}(\mathbf{R}_w^{1/2} \mathbf{Y} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{Y}' \mathbf{R}_w^{1/2})$ ,由文献[12]可知,通过加入一个辅助变量  $\mathbf{X}$ ,由 Schur 分解<sup>[13]</sup>得:

$$\begin{aligned} \min_X \operatorname{tr}(\mathbf{X}), \\ \text{s.t. } \begin{bmatrix} \mathbf{X} & \mathbf{R}_w^{1/2} \mathbf{Y} \\ \mathbf{Y}' \mathbf{R}_w^{1/2} & \mathbf{P} \end{bmatrix} > 0. \end{aligned} \quad (16)$$

则 LQR 问题的 LMI 完整表达式为:

$$\begin{aligned} \min_{P,Y,X} \operatorname{tr}(\mathbf{Q}_w \mathbf{P}) + \operatorname{tr}(\mathbf{X}), \\ \text{s.t. } \begin{bmatrix} \mathbf{X} & \mathbf{R}_w^{1/2} \mathbf{Y} \\ \mathbf{Y}' \mathbf{R}_w^{1/2} & \mathbf{P} \end{bmatrix} > 0, \quad \mathbf{P} > 0, \\ (\mathbf{A}_i + \mathbf{B}_{ui} \mathbf{K}) \mathbf{P} + \mathbf{P} (\mathbf{A}_i + \mathbf{B}_{ui} \mathbf{K})' + \mathbf{I} < 0, \quad i = 1, \dots, 4. \end{aligned} \quad (17)$$

利用 MATLAB 中的 LMI 工具箱编写式(17),同时选择权系数矩阵  $\mathbf{R}_w$  和  $\mathbf{Q}_w$ ,只要在约束下就能够解决最小化的问题,则 LQR 控制器可表示为  $\mathbf{K} = \mathbf{Y} \mathbf{P}^{-1} = [\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{K}_3]$ . 通过 LMI 求解 LQR 控制器问题的优点是考虑了不确定性问题,且满足了一定的动态特性.

## 4 参数设计与仿真

### 4.1 参数设计

根据表 1 中所列出的实验参数,通过使用 MATLAB 中的 LMI 工具箱得到控制矩阵  $\mathbf{K}$ ,为了突出鲁棒 LQR 的优越性,将其与经典的 PI 控制进行比较.

同时根据文献[14],发现权系数矩阵  $\mathbf{R}_w$  和  $\mathbf{Q}_w$  选取如下能够获得满意的效果,即:

$$\mathbf{R}_w = 1, \mathbf{Q}_w = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2\text{E}7 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

将表 1 中的参数和式(18)代入式(17)中求解,可得基于 LMI 的鲁棒 LQR 控制器  $\mathbf{K}$ :

$$\mathbf{K} = [\mathbf{K}_1 \quad \mathbf{K}_2 \quad \mathbf{K}_3] = [2.2 \quad 15.7 \quad -2 \ 387.9]. \quad (19)$$

### 4.2 仿真验证

为了验证本文所提方法的有效性,利用 MATLAB/simulink 进行仿真实验. 图 3 表示在双闭环 PI 控制下,储能系统在超级电容端电压为 100 V 和 150 V 时的母线电压及超级电容电流波形. 如图 3(a)所示,当超级电容端电压为 100 V 时,在 1.3 s 负载由 30  $\Omega$  变化到 50  $\Omega$ ,母线电压发生跌落,超级电容立即响应释放能量,电流由 0 A 上升到 30 A,在 1.8 s 母线电压恢复至 350 V. 整个放电过程中,母线电压最大跌落了约 50 V,且恢复至稳定值的时间约为 500 ms. 为了体现能量的双向流动性,在 2.5 s 时投入光伏电源 S 给超级电容充电,光伏电源投入的过程也可看作为一个外部扰动. 由图 3(b)中可以看出,光伏电源投入后,母线电压上升了约 70 V,此时超级电容立即响应吸收能量,电流由之前稳定的 30 A 跌落至 -10 A,在 3.1 s

表 1 电路参数

Table 1 Circuit parameter

参数	数值
电感电阻 $R/\Omega$	0.5
占空比 $D$	[0.286, 0.428]
参考电压 $V_{\text{ref}}/\text{V}$	350
端电压 $V_i/\text{V}$	[100, 150]
母线电容 $C/\text{mF}$	6.5
电感 $L/\text{mH}$	2
负载 $R_L/\Omega$	[30, 50]
开关频率 $f/\text{kHz}$	128

时,母线电压恢复至 350 V. 在充电过程中,母线电压恢复至稳定值的时间大约为 600 ms. 同理,在图 3(b)中,当超级电容端电压为 150 V 时,在 1.3 s 负载由  $30\ \Omega$  变化到  $50\ \Omega$ ,母线电压发生跌落,母线电压最大跌落了约 32 V,且恢复至稳定值的时间同样较长. 在 2.5 s 时投入光伏电源 S 给超级电容充电,母线电压上升了大约 60 V,恢复至稳定值的时间同样较长.

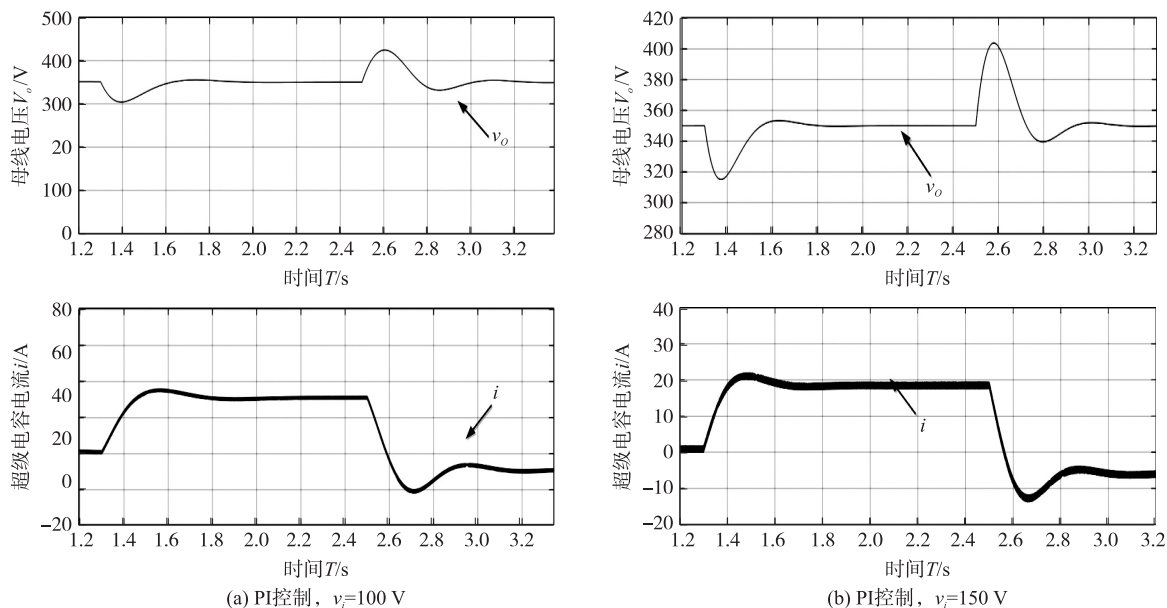


图 3 PI 控制

Fig. 3 PI control

图 4 表示在鲁棒 LQR 控制下,储能系统在超级电容端电压为 100 V 和 150 V 时的母线电压以及超级电容电流波形. 如图 4(a)所示,当超级电容端电压为 100 V 时,在 0.8 s 负载由  $30\ \Omega$  变化到  $50\ \Omega$ ,母线电压发生跌落,超级电容立即响应释放能量,电流由 0 A 上升到 25 A,且得益于 LQR 控制器具有无穷大的幅值裕度和大于  $60^\circ$  的相角裕度,母线电压很快恢复至 350 V. 整个放电过程中,母线电压最大跌落了约 10 V,且恢复至稳定值的时间约为 20 ms. 为了体现能量的双向流动性,在 1.2 s 时投入光伏电源 S 给超级电容充电,光伏电源投入的过程也同样看作是一个外部扰动. 由图 4(b)可以看出,光伏电源投入后,母线电压上升了大约 11 V,此时超级电容立即响应吸收能量,电流由之前稳定的 25 A 跌落至 -10 A,同样地,

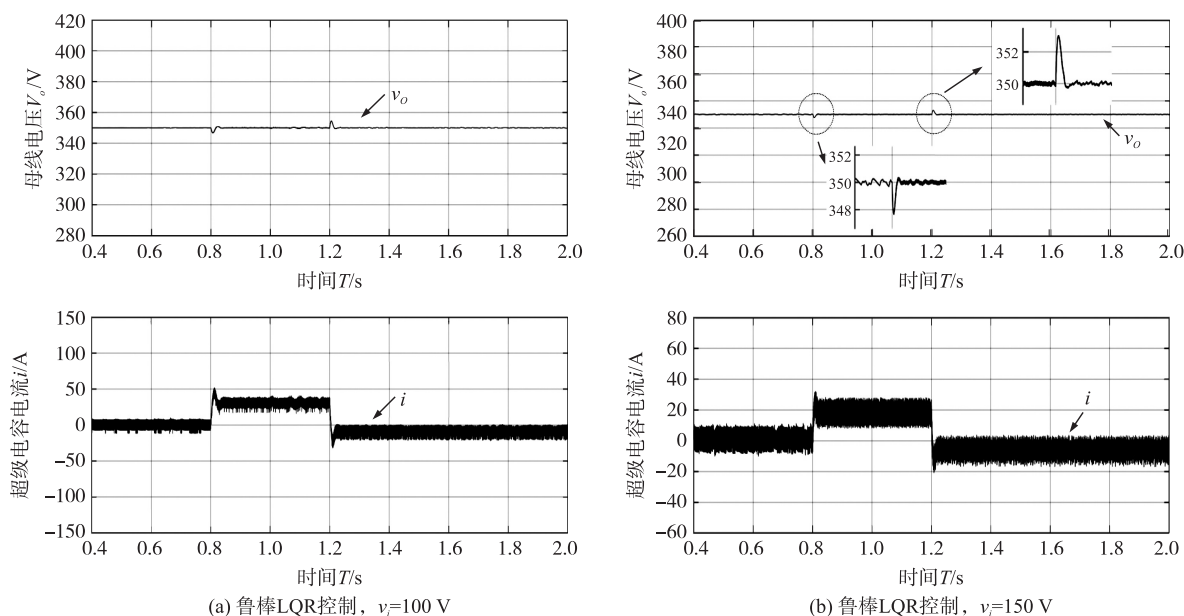


图 4 鲁棒 LQR 控制

Fig. 4 Robust LQR control

母线电压很快地恢复至 350 V. 在充电过程中, 母线电压恢复至稳定值的时间大约为 19 ms. 同理, 在图 4(b) 中, 当超级电容端电压为 150 V 时, 在 0.8 s 负载由 30  $\Omega$  变化到 50  $\Omega$ , 母线电压发生跌落, 母线电压最大跌落了仅约 2 V, 且恢复至稳定值的时间更短. 在 1.2 s 时投入光伏电源 S 给超级电容充电, 母线电压上升了大约 3 V, 同样恢复至稳定值的时间更短.

综上所述, 在系统参数发生变化甚至存在外部扰动的情况下, 储能系统采用鲁棒 LQR 控制相比于采用经典的双闭环 PI 控制能够更快、更好地稳定母线电压, 具备较强的鲁棒性, 可保证系统的稳定运行.

## 5 结语

本文针对在孤岛条件下, 超级电容储能系统中超级电容端电压和负载参数发生变化对母线电压造成波动的情况, 提出了一种鲁棒 LQR 的控制方法. 选择系统参数中的超级电容端电压和母线侧负载作为变化的不确定量, 根据建立的小信号模型, 利用凸优化理论推导出了多胞体模型, 并用 LMI 的方法计算出满足约束条件的 LQR 控制器. 仿真结果表明, 在系统参数发生变化甚至发生外部干扰的情况下, 鲁棒 LQR 控制器相较于传统的 PI 控制能够更快、更好地稳定母线电压, 保证系统的稳定运行.

### [参考文献] (References)

- [1] 李建林, 修晓青, 惠东, 等. 储能系统关键技术及其在微网中的应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.  
LI J L, XIU X Q, HUI D, et al. Key technology of energy storage system and its application in microgrid[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016. (in Chinese)
- [2] 曹成琦, 王欣, 秦斌, 等. 超级电容储能系统中双向 DC-DC 变换器控制策略研究[J]. 湖南工业大学学报, 2016, 30(6): 18-22.  
CAO C Q, WANG X, QIN B, et al. Research on control strategy for Bi-directional DC-DC converter in Super capacitor energy storage system[J]. Journal of Hunan university of technology, 2016, 30(6): 18-22. (in Chinese)
- [3] 邵永明, 张朝川, 尹泰康. 微电网混合储能功率分频控制策略研究[J]. 电工电气, 2016(9): 12-16.  
SHAO Y M, ZHANG C C, YIN T K. Study on control strategy of power fractional frequency with hybrid energy storage of microgrid[J]. Electrical and electronics, 2016(9): 12-16. (in Chinese)
- [4] OLALLA C, LEYVA R, AROUDI A E, et al. Robust LQR control for PWM converters: an LMI approach[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2009, 56(7): 2548-2558.
- [5] KO, HEESANG, JATSKEVICH, et al. An advanced LMI-based-LQR design for voltage control of grid-connected wind farm[J]. Electric power systems research, 2008, 78(4): 539-546.
- [6] PANDEY S K, MOHANTY S R, KISHOR N, et al. An advanced LMI-based-LQR design for load frequency control of an autonomous hybrid generation system[M]//LUIS M C, SLAVISA T, PAULA G. Technological innovation for the internet of things. Heidelberg Dordrecht: Springer, 2013.
- [7] OLALLA C, LEYVA R, AROUDI A E, et al. LMI robust control design for boost PWM converters[J]. Iet power electronics, 2009, 3(1): 75-85.
- [8] LI Z, LIU Y, WANG S, et al. Robust  $H_{\infty}$  control for eccentric buildings via LMI approach[J]. Journal of vibration measurement and diagnosis, 2014, 34(5): 857-863.
- [9] DEEPALI D, MANISHA B. An LMI approach for robust LQR control of PWM buck converter with parasitics[J]. IEEE international conference on communication systems and network technologies, 2017, 36(7): 103-108.
- [10] CHURILOV A N. An LMI approach to stability analysis of PWM DC-DC buck converters[J]. Radioengineering, 2006, 6(4): 592-595.
- [11] 张卫平. 开关变换器的建模与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.  
ZHANG W P. Modeling and control of switching converter[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006. (in Chinese)
- [12] FERON E, BALAKRISHNAN V, BOYD S, et al. Numerical methods for H-2 related problems[J]. American Control Conference. Chicago: IEEE, 1992: 2921-2922.
- [13] 俞立. 鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.  
YU L. Robust control—Linear matrix inequality processing method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. (in Chinese)
- [14] 黄勤, 柳杨, 凌睿. 基于不确定参数的双重有源桥变换器优化控制[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(3): 247-251.  
HUANG Q, LIU Y, LING R. Optimized control for dual active bridge converter based on uncertain parameters[J]. Computer engineering and applications, 2016, 52(3): 247-251. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]