

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902496

孤岛微网 DC/AC 逆变器电压 H_∞ 鲁棒控制

邓玮璋 周江林
(上海电力大学 电气工程学院 上海 200090)

摘 要:DC/AC 逆变器控制策略的优劣直接影响到孤岛微网系统电压质量水平,针对其在电压环采用 PI 控制时的抗干扰和参数摄动性能不佳问题,提出了一种电压 H_∞ 鲁棒控制方法。该方法采用集中式二次电压调节,恢复了由传统下垂控制造成的电压频率跌落。通过将负荷电流视为外部扰动输入量,建立了孤岛微网简化数学状态空间模型;基于混合灵敏度优化问题选择加权函数 W_1 、 W_2 、 W_3 ,设计了电压 H_∞ 鲁棒控制器,以提高 DC/AC 逆变器的抗扰动能力,同时优化其在系统参数摄动时的鲁棒性能。最后通过 MATLAB/Simulink 仿真验证了该控制策略的可行性,并表明了电压 H_∞ 鲁棒控制器能够保证 DC/AC 逆变器具备较强的抗干扰和鲁棒稳定性能。

关键词: 孤岛微网;二次电压调节;负荷扰动;参数摄动; H_∞ 鲁棒控制

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

H_∞ robust voltage control for DC/AC inverter in islanded microgrid

Deng Weihua Zhou Jianglin
(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract:The performance of the DC/AC inverter control strategy has a significant influence on the voltage level of the islanded microgrid system. The traditional PI control in voltage loop cannot meet the system performance requirement under load disturbance or parameter perturbation. Aiming at this problem, a voltage H_∞ robust control method for the DC/AC inverter in islanded microgrid is proposed. A centralized secondary voltage regulation is used to restore the voltage deviation caused by conventional droop control. By considering the load current as the external disturbance input, the simplified mathematical state space model of the island microgrid is established. Then, a voltage H_∞ robust controller is designed by selected weighting functions based on the mixed sensitivity optimization problem, which can improve the ability of DC/AC inverter so that its robust performance can be optimized under the system parameter perturbation. Finally, the numerical simulation result shows that the proposed strategy is feasible and the H_∞ robust controller is of the stronger stability under disturbance.

Keywords: islanded microgrid; secondary voltage regulation; load disturbance; parameter perturbation; H_∞ robust control

0 引 言

近年来,微电网的应用日益广泛。微电网是指在一定区域内由分布式发电(distributed generation, DG)单元、储能电池、负荷和继电保护装置构成的系统,它一般具有并网和孤岛两种运行模式^[1-2]。孤岛模式下的微电网控制比并网模式下的微电网控制更为复杂。在并网模式下,微电网系统电压和频率由大电网支撑。而在孤岛模

式下,由多台 DG 单元通过 DC/AC 逆变器共同调节系统的电压和频率。DG 单元与负荷之间的功率不匹配会导致负荷电压和频率偏离其允许值,甚至可能会影响孤岛微网系统的稳定性。同时孤岛微网是一种低惯性系统,在运行过程中由于负荷扰动、负荷频繁切换或系统参数变化等因素的影响,系统的动力学变化很大^[3]。因此要求控制 DC/AC 逆变器的控制器设计应具备能够维持系统电压频率稳定及实现各 DG 单元合理分配功率的能力^[4]。本文的关注重点是孤岛微网系统的电压质量

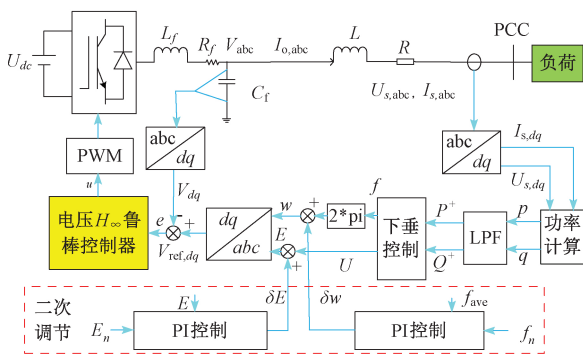
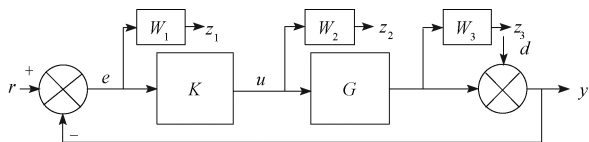


图2 DC/AC 逆变器鲁棒电压控制结构

Fig.2 Robust voltage control structure of DC/AC inverter

为被控对象的传递函数, K 为 H_∞ 控制器的传递函数; r 为参考信号; d 为干扰输入信号; e 为跟踪误差; u 为控制器输出信号; y 为可检测到的输出信号; W_1, W_2, W_3 为加权函数; z_1, z_2, z_3 是系统的被控输出, 表示系统对控制性能的要求, 一般包括跟踪误差、误差调节和执行机构输出^[11-15]。

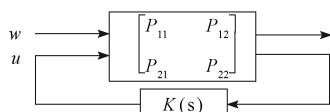
图3 基于混合灵敏度优化的 H_∞ 控制框图Fig.3 Block diagram of H_∞ control based on mixed sensitivity optimization

由图3可知, 从 r 到 e 、从 r 到 u 、从 r 到 y 的传递函数分别为:

$$\begin{cases} S = (1 + GK)^{-1} \\ R = KS \\ T = GK(1 + GK)^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: S 为灵敏度函数; T 为补灵敏度函数。

标准 H_∞ 控制问题如图4所示。参考信号 r 和干扰输入信号 d 组成的外部输入信号 w ; $K(s)$ 为鲁棒控制器; $P(s)$ 表示广义被控对象, 它包括实际被控对象和为了描述鲁棒性能指标而设定的加权函数 W_1, W_2, W_3 。

图4 标准 H_∞ 控制问题Fig.4 Control strategy of standard H_∞

由图4可知, 从 w 到 z 的闭环传递函数为:

$$T_{zw}(s) = P_{11}(s) + \frac{P_{12}(s)KP_{21}(s)}{I - P_{22}(s)K} \quad (5)$$

由文献[11]可知, 基于混合灵敏度优化的 H_∞ 控制问题就是计算控制器 K , 使得闭环系统渐进稳定, 同时使 $T_{zw}(s)$ 的 H_∞ 范数极小化, 即满足式(6)。

$$\|T_{zw}\|_\infty = \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_2 R \\ W_3 T \end{bmatrix} \leq 1 \quad (6)$$

由式(6)可知, 可通过选择合适的权函数 W_1, W_2, W_3 构建 S, R, T 混合灵敏度函数以达到系统鲁棒性能设计的要求。

3 电压 H_∞ 鲁棒控制器设计

3.1 孤岛微电网数学模型

本文假设负荷的具体拓扑结构和参数未知, 将负荷电流视为扰动输入量, 将孤岛微网数学模型简化为单台 DG 单元的等值电路数学模型, 其等值电路见如图5所示。图中, U_{abc} 为逆变器输出基波分量; V_{abc} 为电容电压; $i_{o,abc}$ 为负荷电流; R_f, L_f, C_f 均为 LC 滤波器参数。

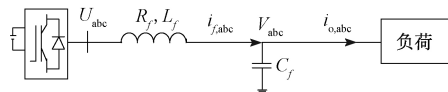


图5 单台 DG 单元等值电路

Fig.5 Equivalent circuit diagram of single DG unit

令电感电流和电容电压为状态变量, 被控对象在 dq 旋转坐标系下的状态空间模型为:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + B_d d \\ y = Cx \end{cases} \quad (7)$$

式中: $x = [V_d \ V_q \ I_{fd} \ I_{fq}]^T$, $u = [U_d \ U_q]^T$ 为输入向量, 扰动电流输入向量 $d = [I_{od} \ I_{oq}]^T$, w_0 为额定角速度, 系数矩阵 A, B, B_d, C 分别为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & w_0 & \frac{1}{C_f} & 0 \\ -w_0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} \\ -\frac{1}{L_f} & 0 & -\frac{R_f}{L_f} & w_0 \\ 0 & -\frac{1}{L_f} & -w_0 & -\frac{R_f}{L_f} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}_d = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_f} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.2 电压 H_∞ 鲁棒控制器设计

1) 加权函数的选择

在设计电压 H_∞ 鲁棒控制器时,需根据图 3 控制框图选择合适的权函数 $\boldsymbol{W}_1$ 、 $\boldsymbol{W}_2$ 、 $\boldsymbol{W}_3$,使得混合灵敏度函数 S 、 R 、 T 满足所设计的鲁棒性能要求。 $\boldsymbol{W}_1$ 表示灵敏度函数 S 的加权函数,在低频段,为了有效抑制外界干扰的影响,要求增益大,因此 $\boldsymbol{W}_1$ 应具有高增益低通特性; $\boldsymbol{W}_2$ 为灵敏度函数 R 的加权函数,用来控制输入信号的大小,以避免系统在实际工作中控制量 u 过大从而造成对执行器的损害; $\boldsymbol{W}_3$ 为灵敏度函数 T 的加权函数,反应了系统的鲁棒性能指标,即高频特性要求^[14-15],故 $\boldsymbol{W}_3$ 一般应具有高通滤波特性。本文根据文献[11-15]选取的 3 个权函数 $\boldsymbol{W}_1$ 、 $\boldsymbol{W}_2$ 、 $\boldsymbol{W}_3$ 的状态空间实现分别为:

$$\boldsymbol{W}_1 = \begin{bmatrix} \frac{50}{s+1.5} & 0 \\ 0 & \frac{50}{s+1.5} \end{bmatrix}, \boldsymbol{W}_2 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{W}_3 = \begin{bmatrix} \frac{s+1000}{s+0.01} & 0 \\ 0 & \frac{s+1000}{s+0.01} \end{bmatrix} \quad (8)$$

2) 控制器求解

根据微电网被控对象状态空间模型式(7)和加权函数式(8),通过 MATLAB 鲁棒控制工具箱(robust control toolbox)求解 Riccati 不等式得到鲁棒控制器,并经过 reduce 函数降阶^[14]后得到鲁棒控制器的状态空间实现形式为:

$$\boldsymbol{K}_\infty(s) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_k & \boldsymbol{B}_k \\ \boldsymbol{C}_k & \boldsymbol{D}_k \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中:

$$\boldsymbol{A}_k = \begin{bmatrix} -0.007\ 757 & 34.15 & -1.824 \\ -39.16 & -1099 & -3750 \\ -15.39 & -3755 & -1.328 \times 10^4 \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{B}_k = \begin{bmatrix} 0.002\ 64 & 0.000\ 232\ 5 \\ 0.981\ 8 & 0.095\ 39 \\ 2.825 & 0.274\ 7 \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{C}_k = \begin{bmatrix} 0.002 & 0.083\ 86 & 0.301\ 5 \\ 0.001\ 7 & 0.982\ 8 & 2.822 \end{bmatrix}, \boldsymbol{D}_k = 0$$

4 仿真验证

为了验证所提出孤岛微网 DC/AC 逆变器电压 H_∞ 鲁棒控制方法的有效性,在 MATLAB/Simulink 仿真实验平台上,本文根据图 2 搭建了含两台同容量 DG 单元的微电网仿真模型,仿真参数如表 1 所示。微电网始终工作在孤岛状态下,两台 DG 的有功出力 and 无功出力比率设置为 1 : 1。系统额定电压和额定频率分别设置为 311 V、50 Hz,原始带负荷为 1 kW+1 kvar,通过仿真验证在突加/突减负荷时单台 DG 的输出电压和系统频率变化情况,同时验证系发生参数摄动时系统电压的谐波含量变化情况。

表 1 微电网系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of microgrid system					
DG ₁ / DG ₂					
参数	数值	参数	数值	参数	数值
U_{dc}/V	800	R/Ω	0.06	k_{pf}	0.04
P_n/kW	15	L/H	0.038	k_{if}	20
$Q_n/kvar$	0	C_f/F	50×10^{-6}	k_{pE}	0.1
R_f/Ω	0.05	k_p	2×10^{-5}	k_{iE}	40
L_f/H	$0.6e-3$	k_q	3.8×10^{-4}	w_0	314

4.1 负荷扰动分析

孤岛微网系统中原始带负荷 1 kW+1 kvar,仿真时长为 1 s。在 $t=0.4$ s,突增大负荷扰动 9 kW+9 kvar,此时系统的总负荷变为 10 kW+10 kvar。在 $t=0.7$ s 突减负荷 9 kW+9 kvar,系统总负荷回到初始值。单台 DG 的输出电压及系统频率变化波形如图 6 所示。

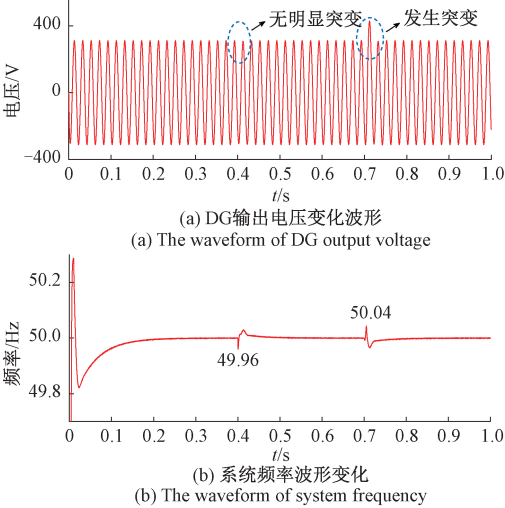


图 6 负荷扰动仿真波形

Fig.6 The simulation waveform of load disturbance

由图 6(a) 可见, 在 $t=0.4\text{ s}$ 时接入负荷后, 输出电压波形无明显大幅度突变; 在 $t=0.7\text{ s}$ 时突减负荷后, 电压波形发生较大幅度突变, 但仍能经过一个波峰后恢复至稳定值, 因此表明了所选取加权函数 W_1 设计的电压 H_∞ 鲁棒控制器具有较好的扰动抑制能力。由图 6(b) 可见, 在 $t=0.4\text{ s}$ 和 $t=0.7\text{ s}$ 时, 系统频率发生偏离后可以恢复至额定值 50 Hz , 表明了二次频率控制可以恢复由下垂控制造成的频率偏差。

图 7 所示为采用 PI 控制和 H_∞ 控制方法下系统电压的波形变化曲线。在传统电压电流 PI 控制中, 电压 PI 控制器的比例参数 k_{pv} 和积分参数 k_{iv} 分别为 1、1 000, 电流内环采用比例控制, 比例系数为 0.8。由图 7 可见, 采用 PI 控制方法时, $t=0.4\text{ s}$ 、 $t=0.7\text{ s}$ 分别突加/突减 $10\text{ kW}+10\text{ kvar}$ 负荷, 此时系统电压最低和最高电压分别为 302.8 、 319 V , 因此电压偏离额定幅值大且恢复至稳定所用时间较长, 系统的鲁棒性较低; 而采用 H_∞ 控制方法后, 在 $t=0.4\text{ s}$ 、 $t=0.7\text{ s}$ 时系统电压最低和最高电压分别为 307.1 、 314.7 V , 系统电压突变幅值相比 PI 控制方法有所降低, 同时电压恢复至稳定值所用时间明显减少, 系统的鲁棒性得到了提高。

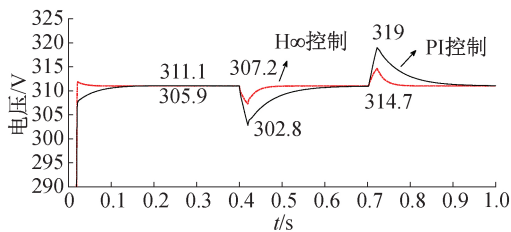


图7 系统电压波形变化

Fig.7 The waveforms change of system voltage

4.2 系统参数扰动分析

为了验证系统参数产生扰动时 H_∞ 控制的鲁棒性能, 通过改变 LC 滤波器参数 R_f 、 L_f 、 C_f , 分析分别在 PI 控制和 H_∞ 控制方法下系统电压的谐波含量变化。图 8 和 9 所示分别为采用 PI 控制和 H_∞ 控制方法下系统参数扰动时电压谐波含量分析结果。对比图 8(a)、9(a) 可知, 在参数无衰减时, 两种控制方式的电压谐波含量分别为 0.96% 和 0.74% 。此时两种控制方法的电能质量无较大差异。由图 8(b)、9(b) 可见, 采用 PI 控制时电压谐波突变为 3.29% , 此时谐波畸变严重, 电能质量明显下滑。而当采用 H_∞ 控制时, 电压谐波含量为 1.73% , 相比 PI 控制电能质量得到了改善。通过上述分析表明, 当系统存在参数扰动时, H_∞ 控制提高电能质量的效果优于 PI 控制。

5 结论

为保证微电网在孤岛模式下系统电压的鲁棒稳定

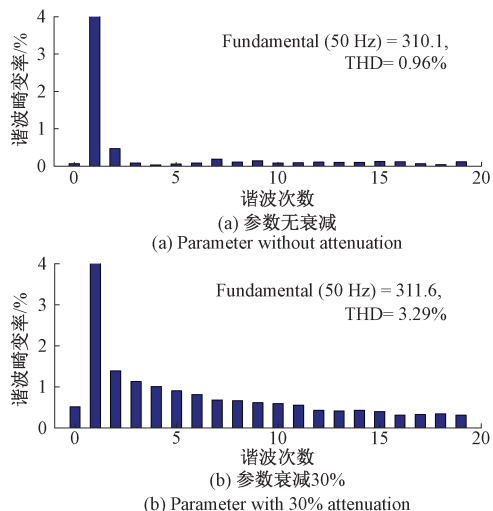
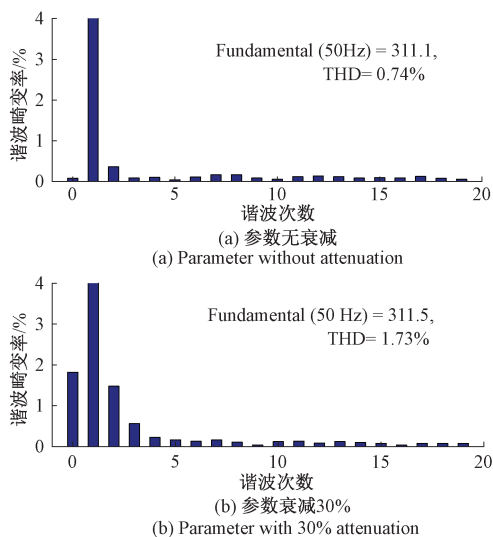


图8 采用 PI 控制时参数扰动电压谐波分析

Fig.8 Voltage harmonic analysis of PI control when parameter perturbation

图9 采用 H_∞ 控制时参数扰动电压谐波分析Fig.9 Voltage harmonic analysis of H_∞ control when parameter perturbation

性, 本文提出了一种用于孤岛微网 DC/AC 逆变器的电压 H_∞ 鲁棒控制策略。该策略在传统下垂控制基础上引入了集中式电压频率二次调节, 同时设计了基于混合灵敏度优化问题的电压 H_∞ 鲁棒控制器。通过 MATLAB/Simulink 仿真平台对所提方法在孤岛微电网进行了仿真验证分析, 得出如下结论。

1) 集中式二次调频调压可降低由传统下垂控制造成的电压频率偏差, 保证系统电压频率幅值稳定。

2) 电压 H_∞ 鲁棒控制器兼顾了系统在发生负荷扰动和滤波器参数扰动时的鲁棒性能, 提高了孤岛系统电压质量水平。

参考文献

- [1] 王成山,武震,李鹏.微电网关键技术研究[J].电工技术学报,2014,29(2):1-12.
WANG CH SH, WU ZH, LI P. Research on key technologies of microgrid [J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2014,29(2):1-12.
- [2] BIDRAM A. Distributed control systems for small-scale power networks: Using multiagent cooperative control theory[J]. IEEE Control Systems, 2014, 34(6):56-77.
- [3] ADERIBOLE A, ZEINELDIN H H, EL MOURSI M S, et al. Domain of stability characterization for hybrid microgrids considering different power sharing conditions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(1):312-323.
- [4] SAHOO S K, SINHA A K, KISHORE N K. Control techniques in AC, DC, and hybrid AC-DC microgrid: A review[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, DOI: 10.1109/JESTPE.2017.2786588.
- [5] ROCABERT J, LUNA A, BLAABJERG F, et al. Control of power converters in AC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11):4734-4749.
- [6] BIDRAM A, DAVOUDI A. Hierarchical structure of microgrids control system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4):1963-1976.
- [7] MOHAMMADI F D, VANASHI H K, FELIACHI A. State-space modeling, analysis, and distributed secondary frequency control of isolated microgrids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(1):155-165.
- [8] 苏晨,吴在军,吕振宇,等.孤立微电网布式二级功率优化控制[J].电网技术,2016,40(9):2689-2697.
SU CH, WU Z J, LV ZH Y, et al. Distributed secondary power optimization control for islanded microgrid [J]. Power System Technology, 2016, 40(9):2689-2697.
- [9] 周烨,汪可友,李国杰,等.基于多智能体一致性算法的微电网分布式分层控制策略[J].电力系统自动化,2017,40(11):142-149.
ZHOU Y, WANG K Y, LI G J, et al. Distributed hierarchical control for microgrid based on multi-agent consensus algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017,40(11):142-149.
- [10] 窦晓波,全相军,陈峰,等.应用于超级电容双向DC/DC变换器的鲁棒控制[J].中国电机工程学报,2018,38(1):223-231.
DOU X B, QUAN X J, CHEN F, et al. Robust control of bidirectional DC/DC convert for super capacitor application[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(1):223-231.
- [11] 陈金元,李相俊,谢巍.基于 H_{∞} 混合灵敏度的微电网频率控制[J].电网技术,2014,38(9):2399-2403.
CHEN J Y, LI X J, XIE W. Microgrid frequency control based on H_{∞} mixed sensitivity [J]. Power System Technolog, 2014, 38(9):2399-2403.
- [12] ETEMADI A H, DAVISON E J, IRAVANI R. A decentralized robust control strategy for multi-DER microgrids—part I: Fundamental concepts [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4):1843-1853.
- [13] ETEMADI A H, DAVISON E J, IRAVANI R. A decentralized robust control strategy for multi-DER microgrids—part II: Performance evaluation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4):1854-1861.
- [14] 汤华,王渝红,魏亮,等. HVDC 孤岛运行附加频率鲁棒控制器设计[J].电网技术,2016,40(4):1066-1072.
TANG H, WANG Y H, WEI L, et al. An additional frequency robust controller for HVDC transmission system under islanding operation[J]. Power System Technolog, 2016, 40(4):1066-1072.
- [15] 庄亚惠,邵辉,王伟,等.基于混合灵敏度的四旋翼飞行器 H_{∞} 姿态控制[J].控制工程,2018,25(10):1814-1818.
ZHUANG Y H, SHAO H, WANG W, et al. H_{∞} attitude control for quad-rotor based on mixed sensitivity [J]. Control Engineering of China, 2018, 25(10):1814-1818.

作者简介



邓玮璋,2012年于上海大学获得博士学位,现为上海电力大学副教授,主要研究方向为研究方向为智能电网、网络控制、鲁棒控制等。

E-mail:dwh197859@126.com

Deng Weihua received his Ph.D. degree from Shanghai University in 2012. Now he is an associate professor at Shanghai University of Electric Power. His main research interests include smart grid, network control, robust control, etc.