

基于完全调节法的广域阻尼鲁棒 H_2/H_∞ 控制策略

马 静,王玉慧,王增平,杨奇逊

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要: 提出一种不受稳定区域限制的广域阻尼鲁棒 H_2/H_∞ 控制方法。首先采用完全调节法获取可调节系统阻尼大小的状态反馈矩阵,在此基础上,考虑系统参数和外界扰动等不确定性因素,设计基于完全调节法的混合 H_2/H_∞ 多目标鲁棒控制策略。以 IEEE 4 机 11 节点系统作为测试对象进行时域仿真,结果表明,该控制策略在阻尼性能和鲁棒性能方面均较传统的 H_2/H_∞ 控制策略有明显优势。

关键词: 电力系统; 低频振荡; 不确定性; 鲁棒 H_2/H_∞ ; 完全调节法; 鲁棒控制; 稳定性

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.009

0 引言

电力系统规模的不断扩大以及运行方式的复杂多变,造成低频振荡现象频繁发生,小干扰稳定问题日益凸显,严重危及了电力系统的稳定运行,因此,分析和抑制低频振荡具有十分重要的意义^[1-4]。

在传统的反馈控制设计中,常将闭环系统的极点配置在复平面上所期望的位置,以保证系统具有较为满意的稳态与动态性能。该类方法在精确获取系统和扰动模型的情况下,均具有较好的阻尼特性,然而一旦模型具有不确定性或运行工况发生变化,配置的极点将偏离期望的位置,很难保证阻尼效果。相比较而言,鲁棒控制方法在应对电力系统参数和外界扰动等不确定性方面具有不可比拟的优势^[5]。其中,混合 H_2/H_∞ 控制理论更是由于综合考虑了系统的稳定性及鲁棒性等因素,受到众多专家和学者的青睐^[6-10]。文献[11]利用 H_2/H_∞ 与区域极点配置结合设计了输出反馈广域阻尼控制器。文献[12]与文献[13]研究了范数有界参数不确定性的 H_2/H_∞ 控制,并分别设计了主动悬架动态输出反馈控制器和用于结构振动控制的动态输出反馈控制器。文献[14]与文献[15]分别将极点配置在左半平面的圆形区域和条状区域,前者设计了静态输出反馈控制器

控制环形永磁力矩电机,后者利用状态反馈附加励磁控制器实现低频振荡的均匀阻尼控制。

在设计混合 H_2/H_∞ 控制器的过程中,为了保证闭环系统的动态和稳态性能,需要将系统的振荡模式转移到左半平面或预先设定的稳定区域,传统方法是利用 Gutman 定理进行振荡模式的转移,但由于该定理求解的稳定区域必须是凸区域,因此在某种程度上限制了振荡模式转移的范围。

针对上述问题,本文提出一种不受稳定区域限制的广域阻尼鲁棒 H_2/H_∞ 控制方法。该方法首先采用完全调节法(由该方法设计的控制器能使系统输出信号的平方积分趋近于 0),获取可调节系统阻尼大小的状态反馈矩阵,该反馈矩阵能够将系统的特征根转移至复平面的左半平面,因此在求解鲁棒控制器过程中无需再进行稳定区域的设置。在此基础上,考虑系统参数和外界扰动等不确定性因素,设计了基于完全调节法的混合 H_2/H_∞ 多目标鲁棒控制策略。最后,以 IEEE 4 机 11 节点系统作为测试对象,进行时域仿真,结果表明该方法不仅具有更好的阻尼特性,而且具有更强的鲁棒性能。

1 理论基础

电力系统的状态方程可描述为:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (1)$$

其中, x 为系统状态向量, u 为控制输入向量, y 为输出向量, A 为系统状态矩阵, B 为控制输入矩阵, C 为输出矩阵。

对于式(1)描述的系统,存在一个动态补偿矩阵^[16] $Q(s)$ 使得:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} C(sI - A)^{-1}BQ(s) = L \quad (2)$$

其中, L 为非奇异常数矩阵, I 为单位矩阵。

令 $(sI - A)^{-1}BQ(s) = L'$, 并对其左乘 $(sI - A)$ 可得:

收稿日期:2012-05-29;修回日期:2013-08-20

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012-CB215200);国家自然科学基金资助项目(51277193,50907021,50837002);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(11MG01);教育部留学回国人员科研启动基金资助项目([2011]1139);河北自然科学基金资助项目(E2012502034);中国电机工程学会电力青年科技创新项目([2012]46)

Project supported by the National Key Basic Research and Development Program of China(973 Program)(2012CB215200), the National Natural Science Foundation of China(51277193, 50907021,50837002), Chinese University Scientific Fund Project (11MG01), the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, State Education Ministry ([2011] 1139), Hebei Natural Science Foundation(E2012502034) and the Electric Power Youth Science and Technology Creativity Foundation of CSEE([2012]46)

$$BQ(s) = (sI - A)L' = (sI - A)T(s) + W \quad (3)$$

其中, $T(s)$ 为多项式矩阵, W 为常数矩阵。

分别对式(3)中 $Q(s)$ 和 $T(s)$ 的第 i 列向量 $q_i(s)$ 和 $t_i(s)$ 进行分解得到:

$$\begin{cases} q_i(s) = q_{i1}s + q_{i2}s^2 + \cdots + q_{ij}s^j \\ t_i(s) = t_{i1} + t_{i2}s + \cdots + t_{ij}s^{j-1} \end{cases} \quad (4)$$

其中, q_{ij} 和 t_{ij} 均为常数列向量。

考虑到 t_{ij} 为线性无关列向量, 存在状态反馈矩阵 $F(\rho)$ 满足:

$$F(\rho)t_{ij} = q_{ij-1} - a_{ij}\rho q_{ij} \quad (5)$$

其中, a_{ij} 为保稳系数, 通过适当选择, 可以保证闭环控制系统的稳定性; ρ 为 H_2/H_∞ 控制的性能指标。

考虑到系统参数和外界扰动等不确定性因素, 系统式(1)可改写为:

$$\begin{cases} \dot{x} = (A + \Delta A)x + (B + \Delta B)u + B_d\omega \\ Y = Cx \end{cases} \quad (6)$$

其中, $[\Delta A \ \Delta B] = E\Delta[F_a \ F_b]$, $\Delta^T\Delta \leq I$, E, F_a, F_b 为已知常数矩阵, 反映了不确定参数的结构信息; B_d 为外界扰动不确定性的加权矩阵; ω 为发电机转速, 是控制输入向量。

将 $u = F(\rho)x$ 代入式(6), 可得电力系统闭环状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x} = (A_c + B_cF(\rho))x + B_d\omega \\ Y = Cx \end{cases} \quad (7)$$

$$A_c = A + \Delta A = A + E\Delta F_a$$

$$B_c = B + \Delta B = B + E\Delta F_b$$

包含不确定性的 H_2/H_∞ 鲁棒控制方法要求式(7)描述的闭环系统同时满足以下目标^[17]。

a. H_∞ 性能: 当 ω 被看作是一个具有有限能量的扰动信号时, 从 ω 到 Y 的闭环传递函数 $T_{\omega Y}(s)$ 的 H_∞ 范数不超过给定的上界 γ 。即 $\|T_{\omega Y}(s)\| \leq \gamma$, 以保证闭环系统具有鲁棒稳定性。

b. H_2 性能: 当 ω 被看作是一个具有单位谱密度的白噪声信号时, 从 ω 到 Y 的闭环传递函数 $T_{\omega Y}(s)$ 的 H_2 范数不超过给定的上界 η , 即 $\|T_{\omega Y}(s)\| \leq \eta$, 以保证用 H_2 范数度量的系统性能处于良好水平。

满足目标 **a** 和 **b** 的充要条件如下所示:

$$\begin{bmatrix} (A_c + B_cF(\rho))X + X(A_c + B_cF(\rho))^T & B_d & XC^T \\ B_d^T & -\gamma I & 0 \\ CX & 0 & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (8)$$

$$(A_c + B_cF(\rho))X + X(A_c + B_cF(\rho))^T < 0 \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} -Z & CX \\ XC^T & -X \end{bmatrix} < 0 \quad (10)$$

$$\text{Trace}(Z) < \eta \quad (11)$$

其中, X, Z 为待求的对称正定矩阵, $\text{Trace}(\cdot)$ 为矩阵的迹。

式(8)~(11)可转换为求解具有线性不等式约束的目标函数最小化问题, 可利用 MATLAB 线性矩阵不等式(LMI)工具箱中相应的求解器 mincx, 计算满足 H_2/H_∞ 控制性能的 ρ , 再将 ρ 代入式(5), 推导出最优状态反馈控制矩阵 $F(\rho)$ 。

2 应用算例

2.1 测试系统

以 IEEE 4 机 11 节点系统^[18]为例, 设计了基于完全调节法的鲁棒 H_2/H_∞ 控制器, 并对其进行时域仿真, 分析其阻尼性能和鲁棒性能。系统结构如图 1 所示。

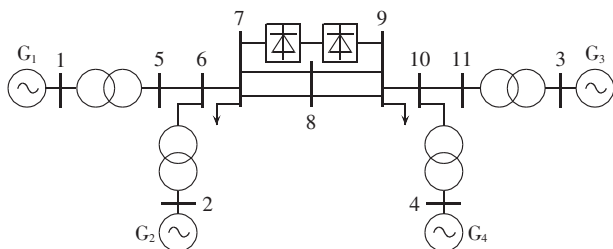


图 1 IEEE 4 机 11 节点电网结构图

Fig.1 Structure of IEEE 4-generator 11-bus grid

发电机采用六阶暂态模型, 励磁系统采用快速励磁, 基准模型下的负荷采用恒阻抗模型, 稳态时联络线传输功率为 399.1 MW。直流线路位于联络线 7~9 之间, 直流附加控制器采用图 2 所示的控制结构, 其中 U_{d0} 为理想空载直流电压; U_d 为平均直流电压; K_1 为比例调节的调节系数; K_2 为积分调节的调节系数; α 为延迟角; $\alpha_{\max}, \alpha_{\min}$ 分别为最大延迟角和最小延迟角; I_d 为直流电流; $I_{\max}, I_{\min}$ 分别为最大电流值和最小电流值; $\Delta P_{\max}, \Delta P_{\min}$ 分别为最大功率变化值和最小功率变化值, 是限幅环节, 分别为 50 MW 和 -50 MW; ΔP_0 为功率变化值; ΔI_0 为与 ΔP_0 对应的电流变化值, 是电流控制的输入信号; I_0 为基准电流。 H_2/H_∞ 控制器的输入信号为发电机 G_1, G_2, G_3 相对 G_4 的转速。

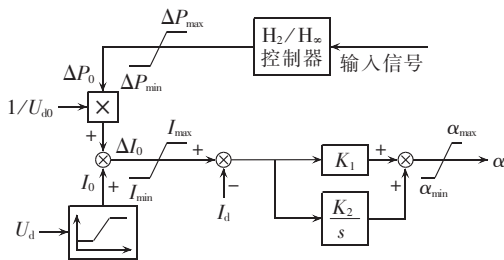


图 2 直流附加控制器结构

Fig.2 Structure of HVDC supplementary controller

利用特征根分析法得到未加控制时系统的振荡模式, 相应的振荡频率和阻尼比如表 1 所示。可以看出, 本系统存在 2 个区内振荡模式和 1 个区间振

表 1 不加控制时 4 机系统机电振荡模式特征值
Tab.1 Eigenvalues of electromechanical oscillation modes of IEEE 4-generator system without control

模式	频率/Hz	阻尼比	类型
1	0.5665	0.0224	区间
2	1.1991	0.0102	区内
3	1.2353	0.0104	区内

荡模式,3 种模式的阻尼比均较小,一旦受到干扰,系统将不能快速恢复到稳定状态。

2.2 仿真验证

本文取保稳系数 $\alpha_{ij}=-1$,通过计算式(8)–(11),求得满足 H_2/H_∞ 控制性能的 $\rho=40$,再将 ρ 代入式(5)可得状态反馈控制矩阵 $F(\rho)$:

$F(\rho)=1000\times$

0

0

0

-1.0135

0.7740

0.4531

0

0

0

1.5055

-1.2647

-2.0179

0

0

0

0.4158

0.0196

-0.9237

0

0

0

-1.0135

0.7740

0.4531

(12)

考虑到系统参数变化与外界扰动等影响因素,设定矩阵 **A**、**B** 中包含 10% 的不确定性。对式(8)–(11)进行求解,可得所设计的状态反馈控制矩阵。初始运行方式选为联络线输送功率 399.1 MW。在以下 3 种类型的扰动情况下,通过与传统的 H_2/H_∞ 控制比较,验证了本方法的有效性与可行性。

情况 1:负荷采用恒阻抗模型, $t=0.1\text{ s}$ 母线 7 与母线 9 间的联络线上发生瞬时性三相短路故障,故障持续时间 0.05 s,0.15 s 时故障切除。

情况 2:负荷采用 50% 恒阻抗、50% 恒电流模型, $t=0.1\text{ s}$ 母线 7 与母线 9 间的联络线上发生三相短路故障,故障持续时间 0.05 s,0.15 s 时故障切除。

情况 3:稳态时联络线上功率为 399.1 MW, $t=0.1\text{ s}$ 母线 7 与母线 9 间的联络线上发生永久性三相短路故障,故障持续时间 0.05 s,0.15 s 时故障切除。

图 3—5 中,(a)、(b)分别为上述 3 种扰动情况下,发电机 G_1 与 G_4 间的功角差 δ_{14} 以及联络线上有功功率 P 的变化曲线。图中控制 1 曲线为基于完全调节法的鲁棒 H_2/H_∞ 控制器的闭环系统响应曲线,控制 2 曲线为传统的 H_2/H_∞ 阻尼控制器的闭环系统响应曲线。

从图 3—5 中可以看出,在系统发生不同扰动的

(a) G_1 – G_4 功角差的时域仿真波形

(b) 联络线功率的时域仿真波形

..... 无控制, —— 控制 1, ---- 控制 2

图 3 情况 1 下的系统动态响应

Fig.3 Dynamic system response in case 1

(a) G_1 – G_4 功角差的时域仿真波形

(b) 联络线功率的时域仿真波形

..... 无控制, —— 控制 1, ---- 控制 2

图 4 情况 2 下的系统动态响应

Fig.4 Dynamic system response in case 2

(a) G_1 – G_4 功角差的时域仿真波形

(b) 联络线功率的时域仿真波形

..... 无控制, —— 控制 1, ---- 控制 2

图 5 情况 3 下的系统动态响应

Fig.5 Dynamic system response in case 3

情况下,本文所提方法均能快速有效地抑制区间低频振荡,且阻尼特性和鲁棒性能均明显优于传统的 H_2/H_∞ 阻尼控制方法。

3 结论

本文提出了一种不受稳定区域限制的广域阻尼鲁棒 H_2/H_∞ 控制方法。首先采用完全调节法获取可调节系统阻尼大小的状态反馈矩阵,在此基础上,考虑系统参数和外界扰动等不确定性因素,设计基于完全调节法的混合 H_2/H_∞ 多目标鲁棒控制策略。最后,以 IEEE 4 机 11 节点系统作为测试系统进行时域仿真,结果表明相比于传统的 H_2/H_∞ 阻尼控制策略,该控制策略具有更好的控制效果和更强的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 郭权利. 电力系统低频振荡[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(22):114-117.
GUO Quanli. Low frequency oscillation in power system [J]. Power System Protection and Control,2008,36(22):114-117.
- [2] 石辉,张勇军,徐涛. 我国智能电网背景下的低频振荡应对研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(24):242-247.
SHI Hui,ZHANG Yongjun,XU Tao. Survey of response to LFO under the background of China smart grid[J]. Power System Protection and Control,2010,38(24):242-247.
- [3] 张子泳,胡志坚,李勇汇,等. 大型双馈风力发电系统小信号动态建模及附加阻尼控制器设计[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(18):127-133.
ZHANG Ziyong,HU Zhijian,LI Yonghui,et al. Small signal dynamic modeling and additional damping controller designing for large wind generation system based on DFIG[J]. Power System Protection and Control,2011,39(18):127-133.
- [4] 马静,彭明法,王彤,等. 基于二阶摄动理论的不确定系统小干扰稳定分析方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):117-120.
MA Jing,PENG Mingfa,WANG Tong,et al. Small signal stability analysis based on second order perturbation theory for uncertain power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7):117-120.
- [5] 梅生伟,申铁龙,刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2008:84-92.
- [6] 马静,王彤,王增平,等. 基于非凸稳定区域的广域阻尼鲁棒控制策略[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):14-18.
MA Jing,WANG Tong,WANG Zengping,et al. Wide-area damping robust control based on non-convex stable region [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):14-18.
- [7] 马静,王彤,杨奇逊. 基于摄动矩阵和凸多胞体的不确定性鲁棒 H_2/H_∞ 控制方法研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):22-27.
MA Jing,WANG Tong,YANG Qixun. Robust H_2/H_∞ control considering uncertainties based on perturbation matrix and polytopic model[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):22-27.
- [8] PASERBA J. Analysis and control of power system oscillation [M]. Paris,France:CIGRE Special Pub,1996:96-118.
- [9] 吴捷,刘永强,陈巍. 现代控制技术在电力系统控制中的应用(一)[J]. 中国电机工程学报,1998,18(6):377-382.
WU Jie,LIU Yongqiang,CHEN Wei. The application of modern control techniques in power system control(I)[J]. Proceedings of the CSEE,1998,18(6):377-382.
- [10] 吴捷,刘永强,陈巍. 现代控制技术在电力系统控制中的应用(二)[J]. 中国电机工程学报,1998,18(6):383-387.
WU Jie,LIU Yongqiang,CHEN Wei. The application of modern control techniques in power system control(II)[J]. Proceedings of the CSEE,1998,18(6):383-387.
- [11] ZHANG Y,BOSE A. Design of wide-area damping controllers for inter-area oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2008,23(3):1136-1143.
- [12] 宋刚,林家浩,吴志刚. 考虑参数不确定性的主动悬架鲁棒 H_2/H_∞ 混合控制[J]. 动力学与控制学报,2008,6(2):156-164.
SONG Gang,LIN Jiahao,WU Zhigang. Robust H_2/H_∞ control of active vehicle suspension subjected to parameter uncertainties [J]. Journal of Dynamics and Control,2008,6(2):156-164.
- [13] 徐亚兰,陈建军,王小兵. 模型不确定压电柔性结构的鲁棒振动控制[J]. 机械强度,2006,28(2):185-189.
XU Yalan,CHEN Jianjun,WANG Xiaobing. Robust vibration control for uncertain flexible structures[J]. Journal of Mechanical Strength,2006,28(2):185-189.
- [14] 孙宜标,金石,王成元. 基于线性矩阵不等式的环形永磁力矩电机的 H_2/H_∞ 静态输出反馈控制[J]. 中国电机工程学报,2007,27(15):8-14.
SUN Yibiao,JIN Shi,WANG Chengyuan. LMI-based H_2/H_∞ static output feedback control for ring permanent magnet torque motor[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(15):8-14.
- [15] 赵书强,马燕峰,顾雪平. 基于区域极点配置的电力系统低频振荡均匀阻尼控制[J]. 电工技术学报,2009,24(12):142-148.
ZHAO Shuqiang,MA Yanfeng,GU Xueping. Uniform damping control of low-frequency oscillations in power systems based on region poles assignment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(12):142-148.
- [16] KIMURA H. A new approach to the perfect regulation and the bounded peaking in linear multivariable control systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control,1981,AC-26(1):253-270.
- [17] 俞力. 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,2002:59-64.
- [18] ROGERS G. Power system oscillations[M]. Dordrecht,Nederland: Kluwer Academic Publishers,2000:78-89.

作者简介:

马 静(1981-),男,河北石家庄人,副教授,博士后,研究方向为电力系统稳定与控制(E-mail:hdmajing@aliyun.com);

王玉慧(1982-),女,山东泰安人,硕士研究生,主要从事电力系统稳定与控制等方面的研究;

王增平(1964-),男,河北辛集人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统自动化、继电保护、变电站综合自动化;

杨奇逊(1937-),男,上海人,中国工程院院士,博士研究生导师,研究方向为电力系统保护与控制。

Wide-area damping robust H_2/H_∞ control strategy based on perfect regulation

MA Jing,WANG Yuhui,WANG Zengping,YANG Qixun

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: A strategy of wide-area damping robust H_2/H_∞ control strategy is proposed,which is not restricted by the stable region. The perfect regulation is applied to obtain the state feedback matrix with adjustable damping coefficients,based on which,a complex H_2/H_∞ control strategy considering the uncertainties of system parameters and external disturbances is designed. Time-domain simulation is carried out for IEEE 4-generator 11-bus system and results show that,compared with the traditional H_2/H_∞ control strategy,it is much better in both damping performance and robustness performance.

Key words: electric power systems; low-frequency oscillation; uncertainty; robust H_2/H_∞ ; perfect regulation; robust control; stability

中国电力教育大学院(校)长联席会第四届第二次会议纪要

2013 年 10 月 18~20 日,中国电力教育大学院(校)长联席会第四届第二次会议在南京市举行,本次会议由河海大学承办、《电力自动化设备》杂志社协办,来自 30 个成员单位的代表及特邀嘉宾共计 50 余人参加了本次会议。

10 月 18 日 14:00,大会在河海大学江宁校区会议中心举行了简朴而隆重的开幕式。本次会议执行主席、河海大学副校长鞠平教授主持了开幕式,并介绍了河海大学及能源与电气学院的发展历史和施教情况。

联席会名誉主席、西安交通大学电气工程学院张保会教授介绍了联席会创立及发展情况,提出了对联席会未来发展的期望;不断加强国际合作,拓宽针对学生教育的国际交流渠道;推动校校交流、校企交流、国内外交流,使中国电气工程做大、做强。

联席会主席、四川大学电气信息学院院长刘俊勇教授致辞,祝贺会议的召开,对与会代表表示欢迎,并介绍了本次会议主题——“电气工程学科专业的前瞻展望与协同创新”,同时对会议进程及工作任务进行了介绍和说明。

为联席会议的成立、发展做出重要贡献的多位专家作为特邀嘉宾出席了本次会议,来自河海大学能源与电气学院的数百位师生参加了会议开幕式并听取了大会报告。

18 日下午,3 位报告人围绕会议主题做了第一阶段大会报告,分别是国家自然科学基金委电工学科丁立健主任的“电工学科基金现状及思考”、北京交通大学姜久春教授的“电动汽车发展与主动配电网”和河海大学袁越教授的“基于大能源观的电力教育”。

19 日上午,第二阶段大会报告继续进行,分别是中国电力科学研究院名誉院长、中国科学院院士周孝信的“面向新一代电网的重大科学技术问题——关于电工学科定位和内涵的思考”,清华大学孙宏斌教授的“分布自治-集中协调的新一代电网能量管理系统若干新进展”。

会议讨论阶段,与会代表围绕“人才培养”、“加强国际交流合作及国际化”、“改善学科项目申报现状”等具体内容进行了交流。会议对 2014 年院(校)长联席会的主题选择进行了探讨,包括电工学科交流国际化的方式问题;学科发展的战略布局,如何能做到做宽、做大、做强;如何在技术层面进行学科的融合、拓宽及共同发展。最后讨论了加强会后沟通和信息互通的方案。

最后,会议经过投票表决,确定 2015 年联席会第四届第四次会议的承办单位为昆明理工大学。
10 月 20 日,本次会议完成所有既定工作任务后圆满闭幕。联席会对本次会议承办方河海大学及国电南京自动化股份有限公司对会议的认真组织和周到安排表示感谢!

中国电力教育大学院(校)长联席会
2013 年 10 月 20 日