

基于 CPS 统计信息自学习机理的 AGC 自适应控制

余涛¹, 陈亮², 蔡广林¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640;

2. 广东省电力调度中心, 广东省广州市 510600)

CPS Statistic Information Self-learning Methodology Based Adaptive Automatic Generation Control

YU Tao¹, CHEN Liang², CAI Guang-lin¹

(1. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China;

2. Guangdong Power Dispatch Center, Guangzhou 510600, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: The paper proposed a novel adaptive control method for power automatic generation control (AGC) systems by using the statistic control performance standard (CPS) information. The purposes of CPS are to enhance the frequency dispatch support effect from power control areas and relax the requirement of area control error (ACE) regulation. The proposed method takes advantage of CPS statistic information to create a group of self-learning rules, which can automatically tune proportional integral (PI) control parameters of AGC system. The adaptive control method is demonstrated effective and easy to be implemented in AGC systems of most power dispatch centers. The case study shows that the pressure of AGC plants is released while the CPS compliance is ensured after using the proposed control method.

KEY WORDS: automatic generation control; control performance standard; adaptive control; self-learning control

摘要: 提出一种利用控制性能标准(control performance standard, CPS)的统计信息进行自动学习, 从而为调度端自动发电控制(automatic generation control, AGC)的比例积分控制参数进行自动调整的自适应控制策略。CPS 标准的提出一方面是为提高区域电网对整个电网频率的支援作用, 另一方面其统计特性放宽对区域控制偏差控制的要求。该自适应控制策略充分利用 CPS 的统计特性, 对电网结构、参数和运行方式具有良好的适应性, 其自学习机制简单实用, 易于在现有大多数电网调度 AGC 系统上实现。以广东电网为对象的实例研究显示, 该 AGC 自适应控制可在保证 CPS 考

核合格率的同时有效减轻发电厂的调节压力。

关键词: 自动发电控制; 控制性能标准; 自适应控制; 自学习控制

0 引言

对于联络线功率与系统频率偏差(tie bias control, TBC)模式下省(区)电网AGC的控制标准, 北美电力可靠性委员会(North American electric reliability council, NERC)在 1997 年推出了最新 CPS/DCS标准^[1], 取代了原来的A标准和B标准。NERC的CPS考核标准由两部分组成: CPS1 是统计联络线功率偏差(area control error, ACE)变化量与频率偏差关系的标准, 作用是控制频率; CPS2 用于限制大的不可接受且不可预见的系统潮流。CPS 标准可明确评估各控制区域长期对电网频率质量的“功过”, 鼓励各控制区域积极参与调整联合系统的运行频率, 充分发挥电网互联的优越性。DCS 标准是衡量电网在大扰动下的事故恢复控制能力, DCS标准要求扰动开始后 15 min内ACE到 0 或扰动前水平。

我国AGC评定标准和控制策略也经历了与北美相似的发展过程。继华东电网率先采用CPS考核指标后, 南方电网也于 2005 年 7 月起开始在全省(区)电网执行CPS考核。已有研究^[1]表明, CPS/DCS 标准代替A标准和B标准后, 原来能量管理系统(energy manage system, EMS)中AGC策略已不适应 CPS考核要求, 必须对原有的控制策略进行重新设

计。国外有学者相继提出了分别适应CPS和DCS逻辑的CPS1、CPS2 和DCS协调控制策略^[2-4]并成功应用于实际电力系统中，有效地提高了电网的CPS/DCS考核合格率。我国学者对基于CPS的AGC分层控制和控制策略从工程化的角度进行了深入研究^[5-8]，特别是南瑞集团的高宗和等学者不仅提出了相应的CPS控制策略，且在实际EMS系统中实现了该控制策略，在华东网调、江苏省调和广东省调等大电网的实际运行中取得了良好的效果^[9-12]。

但上述基于CPS标准的AGC控制策略大多数为增益固定的PI控制结构，难以大范围适应电网结构、参数和运行方式的变化；且PI控制参数缺乏严格的整定规则也给调度运行人员在实际使用中带来许多令人困惑的问题^[13]。

为提高 AGC 控制系统的鲁棒性和适应性，本文提出一种基于 CPS 标准统计信息的 AGC 自适应控制策略。该自适应控制策略充分利用 CPS 的统计特性，对电网结构、参数和运行方式具有良好的适应性，其自学习机制简单实用，易于在现有大多数电网调度 AGC 系统上实现。

1 CPS 标准及其统计特性

1.1 CPS 标准的数学解释

NERC 于 1997 年推出的 CPS 标准由 CPS1 和 CPS2 控制性能评价标准组成。

CPS1 要求对于某*i*区域电网在某一段考核时段(如 10 min)内有

$$\alpha_{CF1} = \frac{\sum (E_{AVE-\min} \cdot \Delta F_{AVE})}{10B_i \cdot n} \leq \varepsilon_1^2 \quad (1)$$

式中： $E_{AVE-\min}$ 为 1 min内ACE的平均值； ΔF_{AVE} 为 1 min频率偏差的平均值； B_i 为控制区域的频率偏差系数； ε_1 为互联电网对全年 1 min频率平均偏差的均方根的控制目标值； n 为该时段内的分钟数。则这一段时段CPS1 的指标的统计公式为

$$C_{CPS1} = (2 - \beta_{CF1}) \times 100\% \quad (2)$$

式中 $\beta_{CF1} = \alpha_{CF1} / \varepsilon_1^2$ 。CPS2 要求考核时段(10 min) ACE 的平均值的绝对值控制在规定的范围 L_{10} 以内，即

$$\left| \sum E_{AVE-\min} \right| / 10 \leq L_{10} \quad (3)$$

式中： $L_{10} = 1.65 \cdot \varepsilon_{10} \cdot \sqrt{(10B_i) \cdot (10B_s)}$ ； B_i 和 B_s 分别为该区域电网和整个互联电网的频率偏差系数； ε_{10} 为互联电网对全年 10 min频率平均偏差的均方根值的控制目标值。

CPS 的考核合格标准可参考 NERC 标准文件[1]。CPS 标准的提出，比传统 A 标准多了对电网频率偏差的考核，尽管这是以乘积的形式出现在 CPS1 中。CPS1 指标中本区域的频率偏差 ΔF 是非常重要的一个影响因子。基于 CPS 的新控制规律应增强对频率偏差 ΔF 的控制。

1.2 CPS 标准的统计特性

火电机组在 AGC 中是主力机组。但是火电机组动力部分是电厂结构最复杂、协调控制最困难的部分，从控制成本来看，频繁的升降功率对电厂来说，经济代价是很高的。因此，NERC 在提出 CPS 标准时不仅注重了区外支援和电网频率的支撑贡献，还用更为宽松的平均值和统计指标来定义 CPS 标准。这样就允许各省(区)电网在执行 CPS 标准时，可不考虑某些不合格的 CPS 实时值，只要整个 10 min考核时段的CPS平均值合格即可，这就客观上为减少AGC控制指令频繁变化给出了行为规范。

但根据控制理论可知，任何一个AGC控制器都不可能将CPS的 10 min平均值作为控制信号引入到控制策略中来(显然 AGC 控制输出不能等 10 min才计算 1 次)，因为这样就“太慢”了。

另一方面，如果控制策略中仅考虑CPS的实时值(每秒一个的实时采样值)来设计AGC控制规律，这就带来所谓的CPS“过完成(over-compliant)”问题。据美国加州独立电力系统(California ISO)研究显示^[4]，当采用过于严格的基于CPS指标的AGC策略时，电网CPS1 和CPS2 还存在较宽松的裕度，适当“放松系统”(relaxation of system)，可有效减少电厂的调节压力；但放松系统也带来增加出现CPS不合格(violations)的风险。

因此在 CPS 控制策略设计中，应兼顾电厂端和调度端 AGC 的二者平衡问题。

2 控制原理

2.1 控制系统结构

为充分利用 CPS 标准的统计特性，本文提出可在电网调度侧实现基于 CPS/DCS 的自适应 AGC 控制结构，如图 1 所示。该控制器的主要构成部分为：

(1) CPS1 控制器。用于对电网 CPS1 指标的实时控制。

(2) CPS2 控制器。用于对电网 ACE 和 CPS2 的实时控制。

(3) DCS 控制器。用于在电网发生大扰动时的紧急恢复控制。

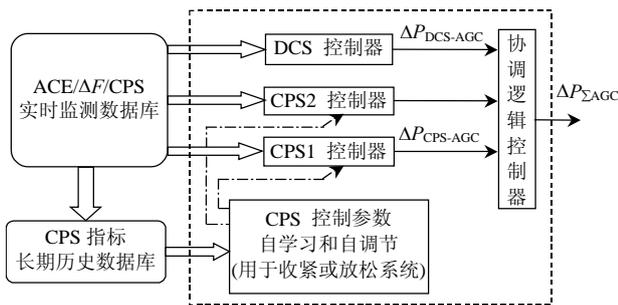


图1 基于CPS/DCS标准的AGC自适应控制结构
Fig.1 CPS/DCS based AGC adaptive control structure

(4) 协调逻辑控制。根据电网当前的状态来协调CPS1、CPS2和DCS各个控制器的输出。一般的协调逻辑是在DCS、CPS2和CPS1中引入ACE控制区域和优先权来划分，其权限是DCS>CPS2>CPS1。

(5) CPS控制器参数的自学习和自动调节。通过分析CPS的历史完成记录，根据CPS合格率进行自学习和控制参数自动调节，实现每月或每年对CPS的动作死区和控制增益进行适当“放松”调整(如动作死区变大，控制增益调小)或“收紧”调整(如动作死区变小，控制增益调大)。

(6) ACE/ΔF/CPS实时监测数据库。主要用来实时采集电网当前的ACE、ΔF和CPS1瞬时值，其数据为CPS/DCS各个子控制器提供电网的状态反馈量。

(7) CPS长期指标记录数据库。主要用来记录和统计每日、每月和每年的CPS完成率，为“放松或收紧系统”提供基础数据。

以上自适应控制结构是一个通用结构，适用于一般的调度端AGC控制。为进一步说明本控制策略的学习机理和参数自调节机理，且便于应用于广东省电力调度中心已用的AGC控制系统，本文以NARI所提出的CPS控制策略作为研究目标^[10-11]。

2.2 CPS控制器及其参数变化规律

NARI提出的基于CPS的AGC控制规律^[10]可表示为

$$\Delta P_{\Sigma AGC} = \Delta P_P + \Delta P_{CPS} + \Delta P_I \quad (4)$$

式中： $\Delta P_{\Sigma AGC}$ 为本控制区域AGC的总调节功率，MW； ΔP_P 为调节功率中的比例分量； ΔP_I 为调节功率中的积分分量； ΔP_{CPS} 为调节功率中的CPS分量。

(1) CPS1控制规律。

式(4)中， ΔP_P 和 ΔP_{CPS} 分量的主要作用是控制CPS1指标，可看作是CPS1控制器。 ΔP_P 和 ΔP_{CPS} 分量的主要控制参数为二者的比例增益 G_P 和 G_{CPS} ，其

详细的控制规律可参见文献^[10-11]。

(2) CPS2控制规律。

式(4)中， ΔP_I 分量主要用来保证ACE在给定的考核时段内的平均值在一定范围内，即CPS2合格。这可通过调节功率中的积分环节来实现，其主要控制参数为积分增益 G_I ，其控制规律可参见文献^[10-11]。

(3) CPS1和CPS2控制规律之间的协调律。

在NARI控制规律中，CPS1和CPS2控制器之间的协调和切换是通过定义多个死区和限幅环节构成^[10-11]。

(4) CPS控制参数的变化规律。

利用IEEE负荷频率控制模型^[10]，以广东电网为对象进行仿真研究，可获得在本区域电网发生阶跃负荷扰动时的 G_P 、 G_{CPS} 和 G_I 的调节规律。此外，对AGC系统中ACE控制区域的死区定义及各个控制环节中最大和最小限制环节定义进行变化规律研究。

综上可得到以下参数变化规律：①加大比例增益 G_P 能提高CPS1，减少ACE值(特别是每分钟的平均值)，但当 G_P 过大时，系统的各个状态量的实时值开始逐渐失去稳定；②ACE值振荡并不意味着其平均值下降，如果不考虑电网频率振荡，仅考虑CPS1和CPS2值，则增大 G_P 对CPS考核有利；③增益系数 G_{CPS} 的增加有利于全面提高电网频率响应、CPS1和CPS2指标；④增大 G_{CPS} 有利于电网频率最大偏差量的减少，但并不有助于其频率残差的减少；⑤积分增益 G_I 的增加可加速整个动态响应中后期残差的迅速减小，但当过大时，系统逐步进入过调状态并逐步过渡为振荡失稳形式；⑥积分增益 G_I 的增加对ACE的减少和过0非常有利，因此积分增益在传统A1/A2准则中扮演极其重要的角色；积分增益 G_I 的增加同样对CPS指标，特别是CPS2的提高十分有利；⑦积分增益除了一味增加会导致振荡失稳以外，积分增益过大也会导致积分控制分量 ΔP_I 过大，从而受到的增加AGC最终限幅环节、电网备用容量和机组上升调节速率等受控对象物理条件的约束；⑧ACE的死区对基于CPS的AGC控制效果影响显著，在扰动一定且其它控制参数完全一样的条件下，ACE死区越小对ACE恢复和CPS指标的提高越有利，即“收紧系统”；但同时也增加了AGC对小负荷扰动的灵敏度；⑨当负荷扰动所引起的ACE变化在所定义的死区附近时，CPS控制器的输出会出现“震颤现象”，这是由于ACE在通过死区

时控制器逻辑反复切换所引起的。

2.3 自学习和参数自调节原理

对于一般的过程控制系统的性能指标,其控制规律的优劣与否完全取决于控制系统的动态特性(衰减率、超调量、调节时间和振荡频率等)^[14-15]。

但 CPS 标准具有明显的统计特点,相对于整个考核时段很小的某一时段 ACE 和 CPS1 实时值不合格,并不会意味着该考核时段 CPS2 和 CPS1 不合格。换句话说, CPS 标准对 AGC 控制系统的动态特性要求并不苛刻,只要满足 CPS1 和 CPS2 综合指标即可。反之,过分追求电网 ACE 和 ΔF 的动态特性而将控制参数整定得过大并没有太多意义,相反,过大的 PI 参数会增加调度端控制命令的下发次数,给发电厂机组的调节带来难度。

从实际工业应用的角度来看,基于参数辨识或参考模型的自适应控制系统^[15]设计方法并不很适用于电力系统 AGC 系统。在此,提出一种非常简单、实用的自学习和参数自调节律:

(1) 步骤 1——初步整定 PI 参数。

对南瑞集团提出的 CPS 控制规律进行数学分析,该控制器可分解为一个对联络线功率偏差和一个对电网频率偏差的 PI 控制器。因此,首先可按工程整定法^[15],如稳定边界法来整定 CPS 控制器中的 2 个 PI 控制器进行参数初始整定,并记为 G_{p0} 、 G_{CPS0} 和 G_{I0} 。

(2) 步骤 2——CPS 指标计算和统计。

如图 1 所示的自适应控制结构, CPS 指标可通过计算机进行实时计算并进行合格律统计。CPS 指标分析是一天每 10 min 进行一次统计分析(即 144 点/天)。CPS1 和 CPS2 分析以是否合格和指标裕度大小两个方面来衡量。

(3) 步骤 3——CPS 控制效果的自我评价和自学习。

从 CPS 统计特性的角度考虑,并不会根据某个 CPS 指标实时值不合格就进行控制器参数调节,而是 24 h 内继续保持该控制参数不变来进行参数评价:①计当日 24 h 内的 CPS 合格率,并更新当月预期的 CPS 合格率;②分析当日的 CPS 合格率是否满足考核要求。考核要求主要是检验 CPS1 不合格次数、CPS2 不合格次数。如果不合格次数较前一天发生超过 5% 的变化(5% 之内的变化可认为是允许变化范围)。如果变化率超过 5% 则可利用类似强化学习方法^[16]给出“奖励”信号(布尔值为 1)或“惩

罚”信号(布尔值为-1)。

(4) 步骤 4——CPS 控制器参数自调节。

若得到“惩罚信号”,即 CPS 考核合格率下降,则必须“收紧”控制系统:①若是 CPS2 指标不满足要求,则步进增大 G_I (步进幅值可为 $5\%G_{I0}$);若增大 G_I 达到了理论最大推荐值或已令 ΔP_I 控制分量进入饱和状态,仍无法提高 CPS2 合格率,则加大积分限幅 I_{max} 定义;②若是 CPS1 指标不满足要求,则步进增大 G_p 和 G_{CPS} (步进幅值可为 $5\%G_{p0}$ 和 $5\%G_{CPS0}$),若增大 G_p 和 G_{CPS} 已达到理论最大推荐值仍无法提高 CPS1 合格率,则收紧 ACE 死区定义;③若通过调整控制器参数仍无法获得满意的 CPS 合格率,则提示系统必须增大电网的可调容量和调节速率。

若得到“奖励信号”,即 CPS 考核合格率提高,则可以“放松”控制系统:①逐步缩小 G_I (缩小幅值可为 $5\%G_{I0}$),并检查 $E_{Ave-min}$ 与 $\pm L_{10}$ 之间的距离是否仍有足够裕度(可根据本电网无意交换电量约束来定义);②逐步缩小 G_p 和 G_{CPS} (缩小幅值可为 $5\%G_{p0}$ 和 $5\%G_{CPS0}$),并检查 CPS1 向下靠近 100% 之间的裕度是否仍在允许范围内(一般定义在 150% 为警戒线)。

(5) 步骤 5——省(区)电网 AGC 控制的整体评价。

全网 AGC 控制的整体评价应该是两方面:①是否有利于电网 CPS 考核合格率的达标,且利于电网奖罚电量效益的提高;②是否有利于网内 AGC 机组调节成本的下降、减少不必要机组的过调和反复调节。

若偏重于电网公司 CPS 考核合格率和效益的提高,则整个自适应系统应该偏重“收紧”系统;若偏重 AGC 机组的调节成本下降,则整个自适应系统则应该偏重“放松”系统。或者,电网公司和发电厂可在以上自适应律上采取一种“折衷”的解决方案:电网公司在 CPS 达标后不再追求一味地提高 CPS 合格率的提高,而是在不牺牲 CPS 达标的前提下,逐步“放松”AGC 控制。

3 仿真研究

仿真对象选择南方电网,所推荐的 AGC 策略设在广东电网,其它省电网采用传统 AGC 策略,典型日负荷曲线选择 2006 年运行方式,扰动采用一组按日每天预先设定 144 个固定负荷扰动的数据,以此来比较控制效果。图 2 显示了整个考核期

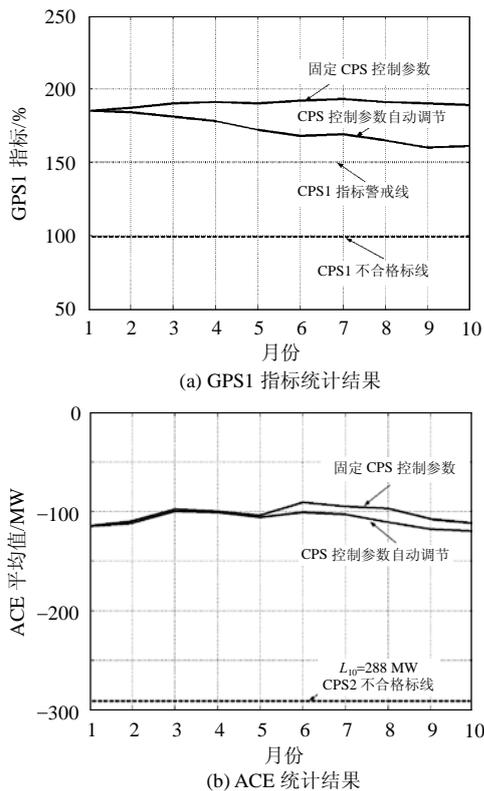


图2 CPS统计结果
Fig. 2 CPS statistic results

(1—10月)的CPS1和ACE平均值变化效果。

通过仿真分析可知,本文提出的自适应CPS控制规律可实现对电网的“放松”控制,尽管增加了ACE平均值,但CPS不合格率并不会增加,且控制指令的调节频率和幅度均有明显下降。类似的,也可得到对电网“收缩”控制的结果。

本文还利用中国电力科学研究所的“全过程动态仿真程序”,应用南方电网220 kV及以上详细电力系统模型进行全面的AGC仿真校验的研究,所提控制策略的有效性通过了有关单位组织的专家鉴定。

4 结论

采用基于CPS指标统计特性的自适应AGC控制策略可具有以下优点:

(1) 完整地继承了国内电网调度中已有AGC平台和AGC控制策略,解决了已有CPS控制策略缺乏严格的参数整定规则的问题。

(2) 在掌握了CPS控制器基本参数调节规律的基础上,提出了根据可随电网拓扑结构变化和运行方式变化的自学习和参数自调节方法,CPS控制实现了自适应控制。

(3) CPS控制中的自适应律对电网CPS合格

率和AGC机组调节成本均进行了考虑和平衡,可根据电网的实际需要向“收紧”或“放松”2个方向作自适应调节。

参考文献

- [1] Jaleeli N, Vanslyck L S. NERC's new control performance standards [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1999, 14(3): 1091-1099.
- [2] Yao M, Shoultz R R, Kelm R. AGC logic based on NERC's new control performance standard and disturbance control standard [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 15(2): 855-857.
- [3] Feliachi A, Rerkpreedapong D. NERC compliant load frequency control design using fuzzy rules[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 73(1): 101-106.
- [4] Makarov Y, Hawkins D. New AGC algorithms[J]. Erican EPRI Infrastructure Integration & Markets Product Line Council Meeting, California, USA, 2002.
- [5] 唐悦中, 张王俊. 基于CPS的AGC控制策略研究[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 75-79.
Tang Yuezhong, Zhang Wangjun. Research on control performance standard based control strategy for AGC[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 75-79(in Chinese).
- [6] 汪德星. 华东电网实行CPS标准的探索[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(8): 41-44.
Wang Dexing. Study of CPS standards in East China power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(8): 41-44(in Chinese).
- [7] 李正, 敬东, 赵强, 等. CPS/DCS标准在大区互联电网AGC控制策略中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(12): 27-32, 48.
Li Zheng, Jing Dong, Zhao Qiang, et al. Application of AGC control strategy based on CPS/DCS standard in interconnected power grid [J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(12): 27-32, 48(in Chinese).
- [8] 杨小熠, 沈松林, 李运平, 等. 华北、东北联网后华北电网自动发电控制(AGC)及其考核的实现[J]. 电网技术, 2001, 25(7): 60-62.
Yang Xiaoyi, Shen Songlin, Li Yunping, et al. Implementation of automatic generation control in North China power grid and its assessment after its interconnection with Northeast China power grid [J]. Power System Technology, 2001, 25(7): 60-62(in Chinese).
- [9] 高宗和. 自动发电控制算法的几点改进[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(22): 49-51.
Gao Zonghe. Some algorithms improvements on AGC software [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(22): 49-51(in Chinese).
- [10] 高宗和, 滕贤亮, 张小白. 互联电网CPS标准下的自动发电控制策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 40-44.
Gao Zonghe, Teng Xianliang, Zhang Xiaobai. CPS control strategy for interconnected power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 40-44(in Chinese).
- [11] 高宗和, 滕贤亮, 涂力群. 互联电网AGC分层控制与CPS控制策略[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 78-81
Gao Zonghe, Teng Xianliang, Tu Liqun. Hierarchical AGC mode and CPS control strategy for interconnected power systems

- [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(1): 78-81(in Chinese).
- [12] 张小白, 高宗和, 钱玉妹, 等. 用 AGC 实现稳定断面越限的预防和校正控制[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 55-59.
Zhang Xiaobai, Gao Zonghe, Qian Yumei, et al. Implementation of preventive and remedial control for tie line overload by use of automatic generation control[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 55-59(in Chinese).
- [13] 余涛, 朱守真, 李东海, 等. 基于扩张状态观测器的电力系统非线性鲁棒协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 1-5.
Yu Tao, Zhu Shouzhen, Li Donghai, et al. Extended-state-observer based nonlinear robust coordinated control of power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 1-5(in Chinese).
- [14] 杨冠城. 电力系统自动装置原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [15] 金以慧. 过程控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [16] 张汝波, 顾国昌, 刘照德, 等. 强化学习理论、算法及应用[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(5): 637-642.
Zhang Rubo, Gu Guochang, Liu Zhaode, et al. Reinforcement learning theory, algorithms and its application[J]. Control Theory and Applications, 2000, 17(5): 637-642(in Chinese).
-
- 收稿日期: 2007-07-23。
- 作者简介:
- 余 涛(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为复杂电力系统的非线性控制理论和仿真研究, taoyu1@scut.edu.cn;
- 陈 亮(1977—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统 AGC、电力市场, chenliang1999@sina.com;
- 蔡广林(1980—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统优化控制方法、电压稳定性, tonsang_ren@163.com。

(编辑 谷 子)