

多时段水火电市场均衡分析

杨建林, 耿静, 严正, 周登波

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 建立了多时段水火电市场均衡模型, 采用猜测供给函数模拟发电商间的策略性行为, 同时考虑网络传输、机组爬坡率及水电机组用水量等约束。算例表明, 网络约束对市场出清结果影响很大, 机组爬坡率约束可能导致火电商在某些时段收益为负。在寡头竞争条件下, 火电商可通过减少其各时段出力方式来增加其收益, 而受放水量限制的水电商则可通过减少峰荷时段发电量并增加其他时段出力方式来牟取更大利润。

关键词: 水火电市场; 寡头竞争环境; 猜测供给函数; 机组爬坡率; 混合线性互补问题

The equilibrium analysis for multi-periods hydro-thermal electricity market

YANG Jian-lin, GENG Jing, YAN Zheng, ZHOU Deng-bo

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: An equilibrium model of multi-periods hydro-thermal electricity market is proposed in this paper, in which GenCos' (Generation Companies') strategic bidding behaviors are properly modeled using conjectured supply function and the transmission limit constraints, the ramp rate constraints of thermal unit and the water consumption constraint of hydro unit are simultaneously considered. Case study shows that the network constraints can affect the market clearing outcomes greatly and the ramp rate constraints could lead to the negative revenue in some periods for the thermal GenCos. In the oligopolistic competitive environment, the thermal GenCo can increase its revenue in the manner of withholding behaviors in each period, while the hydro GenCo can obtain more profit in the manner of increasing the outputs in off-peak periods and decreasing the outputs in peak periods.

Key words: hydro-thermal market; oligopolistic competitive environment; conjectured supply function; ramp rate; mixed linear complementarity problem

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0020-05

0 引言

随着全国各地水电机组的不断并网发电, 水力发电在我国电力市场中的比重越来越大。与火电机组不同, 水电机组一次性投资很大, 但其发电能耗却几乎为零, 且具有很好的调节性能。除了发电, 水电站同时还具有防洪、灌溉及航运等综合利用功能^[1]。

尽管关于水火电联合调度的研究已有很多^[2-6], 但在寡头市场环境下考虑水火电均衡的研究却相对较少^[7-10]。文献[7]建立了美国西部水火电市场均衡模型, 文献[8]评价了水火电市场中存在的市场力, 文献[9]进一步考虑水火电市场中火电机组的机组启停时间等约束, 文献[10]采用动态规划法求解基

于古诺模型的市场均衡问题。以上模型均没有考虑输电网及机组爬坡率约束。另外, 上述文献均采用古诺模型, 当需求弹性很小时, 由古诺模型计算的均衡结果往往偏离实际值很大, 采用猜测供给函数^[11]能够更客观反映发电公司拥有的潜在市场力。因此, 本文同时考虑输电网、机组爬坡率和水电机组用水量等限制, 提出了一种基于猜测供给函数的多时段水火电市场均衡模型。

1 多时段水火电市场均衡模型

本节基于文献[12], 建立了基于猜测供给函数的多时段水火电市场均衡模型。

1.1 基本假设

本文采用了类似文献[12]的基本假设:

1) 模型建立在双边市场环境下, 即发电商与用户直接签订双边电能合同;

基金项目: 国家 863 高技术基金项目 (2007AA05Z458)

- 2) 市场中存在套利;
- 3) 发电商间的博弈行为采用猜测供给函数模拟;
- 4) 发电商认为其无法操纵阻塞价格。

1.2 发电商优化问题

对发电商来说, 其决策变量是各时段发电量和售电量, 其优化目标函数如下:

$$\max \pi_v = \sum_t \left\{ \sum_i (\rho_{v,i}^t - w_i^{t*}) d_{v,i}^t - \sum_{h,j} (\beta_{v,h,j} + \gamma_{v,h,j} g_{v,h,j}^t - w_j^{t*}) g_{v,h,j}^t \right\} \quad (1)$$

其中: π_v 表示发电商 v 的收益函数; $t \in T$ 表示时段 T 内的第 t 时段; i, j 表示节点; $\rho_{v,i}^t$ 表示 t 时刻由发电商 v 所见的节点 i 的节点电价 (在均衡解时所有发电商所对应的 $\rho_{v,i}^t$ 应该相等, 且都等于 ρ_i^{t*}); w_i^{t*} 表示 t 时刻节点 i 阻塞价格的均衡值; $d_{v,i}^t$ 表示 t 时刻由发电商 v 对节点 i 上负荷的售电量; $g_{v,h,j}^t$ 表示 t 时刻发电商 v 在节点 i 上的第 h 种发电单元 ($h=1$ 表示该机组为火电机组, $h=2$ 表示该机组为水电机组) 的发电量; $\beta_{v,h,i}, \alpha_{v,h,i}$ 分别表示发电商 v 在节点 i 的第 h 种发电单元的成本函数 $\beta_{v,h,i} + \alpha_{v,h,i} g_{v,h,i}$ 的常数项和线性项 (对水电机组来说, $\alpha_{v,h,i}, \beta_{v,h,i} = 0$)。

式 (1) 中的第一项表示售电收益, 第二项表示发电成本, 另外, 阻塞成本 w_i, w_j 均由发电商承担。

等式约束条件包括电力平衡约束, 即:

$$\sum_i d_{v,i}^t - \sum_{h,j} g_{v,h,j}^t = 0 \leftrightarrow (\phi_v^t) \quad (2)$$

其中, ϕ_v^t 为相应 Lagrange 乘子, 后面类似符号也表示相应约束的 Lagrange 乘子。

不等式约束包括发电容量及机组爬坡率约束, 分别如下式 (3)、(4) 及式 (5)、(6) 所示:

$$g_{v,h,i}^t - \bar{g}_{v,h,i} \leq 0 \leftrightarrow (\bar{\mu}_{v,h,i}^t) \quad (3)$$

$$\underline{g}_{v,h,i} - g_{v,h,i}^t \leq 0 \leftrightarrow (\underline{\mu}_{v,h,i}^t) \quad (4)$$

$$g_{v,1,i}^t - g_{v,1,i}^{t-1} \leq \bar{\Delta}_{v,1,i} \leftrightarrow (\bar{\varphi}_{v,1,i}^t) \quad (5)$$

$$g_{v,1,i}^{t-1} - g_{v,1,i}^t \leq \underline{\Delta}_{v,1,i} \leftrightarrow (\underline{\varphi}_{v,1,i}^t) \quad (6)$$

其中: $\bar{g}_{v,h,i}, \underline{g}_{v,h,i}$ 分别表示相应发电机出力上下限; $\bar{\Delta}_{v,1,i}, \underline{\Delta}_{v,1,i}$ 分别表示火电机组的爬坡率上下限 (考虑

到水电机组可调节性好, 故忽略其爬坡率约束)。

节点 i 的负荷 d_i^t 由发电商和 ISO (通过套利电量 a_i^t) 共同提供, 即:

$$d_i^t = d_{v,i}^t + d_{-v,i}^t + a_i^t \quad (d_{-v,i}^t = \sum_{g \neq v} d_{g,i}^t) \quad (7)$$

与古诺模型中假设 $d_{-v,i}$ 不变不同, 本文采用猜测供给函数模型竞争对手对发电商 v 策略行为的反应, 其表达式如下:

$$d_{-v,i}^t = d_{-v,i}^{t*} + B_{-v,i} (\rho_{v,i}^t - \rho_i^{t*}) \quad (8)$$

其中: $d_{-v,i}^{t*}, \rho_i^{t*}$ 分别为竞争对手在节点产量及节点电价的均衡值; $B_{-v,i}$ 为猜测常数, 可根据历史数据推算获得。当 $B_{-v,i} = 0$, 就是常见的古诺模型; 当 $B_{-v,i} \rightarrow \infty$ 就是完全竞争市场模型; 伴随着 $B_{-v,i}$ 的增大, 市场竞争性愈强。第 t 时段由发电商 v 所见的节点 i 对应节点电价 $\rho_{v,i}^t$ 可表示如下:

$$\rho_{v,i}^t = \rho_{oi}^t - (\rho_{oi}^t / d_{oi}^t) (d_{v,i}^t + d_{-v,i}^t + a_i^{t*}) \quad (9)$$

其中: ρ_{oi}^t, d_{oi}^t 分别为节点 i 对应逆负荷曲线的价格和负荷截距; a_i^{t*} 为套利电量均衡值。

另外, 与火电不同, 对任意位于节点 i 上水电机组 (属于发电商 v) 来说, 其 t 时刻的发电出力 $g_{v,2,i}^t$ (MW/s) 取决于水头 $H_{v,2,i}^t$ (m) 和发电流量 $Q_{v,2,i}^t$ (m³/s), 即^[13]:

$$g_{v,2,i}^t = 9.81 \cdot \eta_{v,2,i} \cdot H_{v,2,i}^t \cdot Q_{v,2,i}^t \quad (10)$$

其中, $\eta_{v,2,i}$ 为水电机组的效率常数。

一般而言, 大型水库具有多年调节性能, 其容积和水面面积均很大, 加之在水库放水发电的同时, 水库上游不断还有径流入库, 因而水库水位在较短时间内不会因水库蓄水量的增加或减少而有较大变化, 故本文假定一天内水力发电水头 $H_{v,h,i}$ 保持恒定。另外, 类似文献[6-7], 本文假设水库调度员在一天内总放水量预先给定, 根据式 (10), 该水电机组在一天内的总发电量 $HYO_{v,2,i}$ 便为恒定 (注: 本文不考虑故意弃水), 即:

$$\sum_t g_{v,2,i}^t = HYO_{v,2,i} \leftrightarrow (\sigma_{v,2,i}) \quad (11)$$

其中, $g_{v,2,i}^t$ 为水电机组在相应时段内出力。

1.3 ISO 优化问题

ISO 的目的是通过有效安排传输容量来实现其自身收益的最大化。ISO 收益由阻塞收益和套利收益组成, 其目标函数如下:

$$\max \sum_{t,i} [w_i^* p_i^t + (p_i^* - w_i^*) a_i^t] \quad (12)$$

其中： p_i^t, a_i^t 分别为节点 i 的净负荷和套利电量。不等式约束为传输约束，即：

$$\sum_i J_{k,i} p_i^t - \bar{F}_k \leq 0 \leftrightarrow (\lambda_k^{t+}) k \in FG \quad (13)$$

$$-\sum_i J_{k,i} p_i^t - \bar{F}_k \leq 0 \leftrightarrow (\lambda_k^{t-}) k \in FG \quad (14)$$

其中，式 (13)、(14) 分别表示正反两方向的潮流约束。 $J_{k,i}$ 表示 PTDF 矩阵元素，即节点 i 的单位注入引起支路 k 上功率的变化， FG 表示关键支路集。

等式约束包括套利电量平衡约束：

$$\sum_i a_i^t = 0 \leftrightarrow (\rho_s^t) \quad (15)$$

其中， ρ_s^t 为平衡节点电价。

1.4 市场出清条件

本均衡模型包含两类市场出清条件：

能量出清条件：

$$\rho_i^{t*} = \rho_{oi}^t - (\rho_{oi}^t / d_{oi}^t)(d_{v,i}^t + d_{-v,i}^t + a_i^{t*}) \quad (16)$$

传输出清条件：

$$p_i^t = a_i^t + \sum_v (d_{v,i}^t - \sum_h g_{v,h,i}^t) \quad (17)$$

2 均衡模型的推导及其求解

考虑到发电商和 ISO 对应的优化问题都属于凸规划问题，故其相应 KKT 条件均构成各自优化问题的充要条件。联立这些 KKT 条件和相应的市场出清条件，便得到该问题对应的均衡互补条件，满足该均衡互补条件的解便是原问题的 Nash 均衡解。

容易验证，本文建立均衡模型是一个标准的混合线性互补问题 (MLCP)。由文献[14]可知，在满足一定条件下，混合线性互补问题等价于一个凸二次规划问题，因而其解的存在性和唯一性也能得到保证。本文利用求解 MLCP 问题的 PATH 软件^[15]进行求解。

3 算例及结果分析

本文采用图 1 所示 6 节点算例。系统中所有支路具有相同电抗，有两条关键线路，即支路 1-6、2-5，其热稳定极限均为 200 MW。发电商参数见表 1，负荷数据取自文献[16]。假设火电机组对应 $\bar{A}_{v,i}, \underline{A}_{v,i}$ 均为 20 MW/h。另外，还假设 $HYO_{1,2,1}$ 等于 10 000 MW。

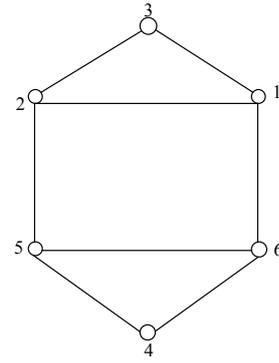


图 1 6 节点网络示意图

Fig.1 Configuration figure of 6-node network

表 1 发电商参数

Tab.1 Parameters of generation companies

发电商参数						
i	v	h	$\beta_{v,h,i}$	$\gamma_{v,h,i}$	$\bar{g}_{v,h,i}$	$\underline{g}_{v,h,i}$
1	1	2	0	0	850	0
2	2	1	1.5	0.002	1 000	0
4	3	1	2	0.005	1 000	0

3.1 算例 1~2: 完全竞争市场条件下

首先对完全竞争市场环境 ($B_{-v,j} \rightarrow \infty$) 无网络约束 (算例 1) 和有网络约束 (算例 2) 情况进行比较比较，其计算结果见表 2。

表 2 不同情况市场出清结果

Tab.2 Market outcome in different cases

	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4
$\bar{\rho}_1 / (\$/MWh)$	10.4	8.3	16.9	16.1
$\bar{\rho}_2 / (\$/MWh)$	10.4	6.7	16.9	14.9
$\bar{\rho}_3 / (\$/MWh)$	10.4	7.5	16.9	15.5
$\bar{\rho}_4 / (\$/MWh)$	10.4	11.1	16.9	18.4
$\bar{\rho}_5 / (\$/MWh)$	10.4	11.9	16.9	19.1
$\bar{\rho}_6 / (\$/MWh)$	10.4	10.5	16.9	18.0
TG1/MW	10 000	10 000	10 000	10 000
TG2/MW	24 000	23 677	23 012	21 218
TG3/MW	20 150	21 297	16 642	18 343
RG1/\$	104 614	82 770	173 945	165 802
RG2/\$	165 503	83 662	305 764	246 260
RG3/\$	84 622	97 276	187 542	230 122
$\Sigma \pi_i / \$$	354 739	263 708	667 251	642 184
负荷收益/\$	2 106 000	2 159 780	1 770 360	1 757 630
ISO 收益/\$	0	31 164	0	26 206
社会总收益/\$	2 460 739	2 454 652	2 437 611	2 426 020

注： $\bar{\rho}_i$ 表示第 i 节点对应平均电价，TG i 、RG i 分别表示发电商 i 的总发电量和总收益。

相比无网络约束情况(算例1),算例2中发电商1、2的收益都有较大幅度的减小,而发电商3的收益却明显增加。这主要是因为网络阻塞导致送电区内(包括节点1-3)电价的降低和受电区内(包括节点4-6)电价的升高;另外,网络约束还限制了发电商2的总出力,同时也使得发电商3增加其出力以满足受电区负荷需求。从其他市场参与者收益情况讲,阻塞成本的出现使ISO收益从\$0增加到\$31 164,而社会总收益却减少\$6 087。

3.2 算例3~4:寡头竞争市场条件下

寡头竞争市场下(假设 $B_{-v,i}$ 均等于10)无网络约束(算例3)和有网络约束(算例4)两种情况计算结果见表2。

相对不考虑网络约束而言,算例4中发电商1、2收益均有下降,而发电商3却凭借其天然的位置优势而获得更大收益。

对比算例1~2可以看出,相对完全竞争市场环境,各发电商在寡头市场环境下的收益均有大幅度提高,而负荷收益,ISO收益和社会总收益均有所下降。究其原因,主要由于发电商通过其策略性报价行为抬高了节点电价并减轻电网阻塞程度,从而实现了负荷和ISO收益到发电商收益的转移。

为进一步研究寡头市场环境下水火电不同的策略性行为,本文还将算例2和算例4中发电商在各时段发电量及收益情况分别示于图2和图3(考虑到本算例中各发电商均只拥有一台发电机,故图中采用了G-n-C、G-n-O分别对发电商 $n(n=1,2,3)$ 在完全竞争和寡头垄断市场环境下的状态进行标记)。

由图2、3可以看出,在寡头市场环境下,水火电商分别采用不同的竞价策略来获取更大收益。对火电商来说,主要通过减少各时段出力的方式(这样可以抬高节点电价)来增大其自身收益;而对于受放水量限制的水电商来说,主要采用减少峰荷时段发电量同时增加其他时段出力的方式(有助于进一步抬高峰荷时段电价)来增加其自身效益。

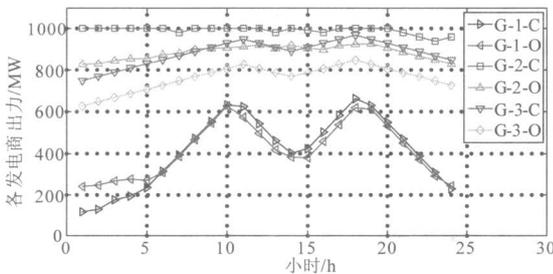


图2 不同市场环境下发电商出力

Fig.2 The GenCos' outputs under different market environments

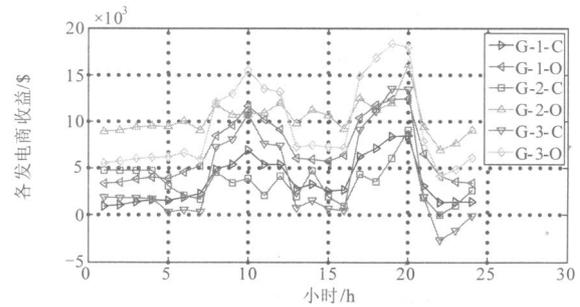


图3 不同市场环境下发电商收益

Fig.3 The GenCos' surpluses under different market environments

由图2还可看出发电商2在谷荷时段出力减少得多些,在峰荷时段出力减少得少些。这是因为在谷荷时段系统中没有阻塞,发电商2减少出力能够有效抬高系统中各节点电价以增加其自身收益;而在峰荷时段,线路阻塞会使发电商2的减出力行为对抬高受电区域电价的作用不大,加之送电区域负荷不重,因而其出力减少量也相对较小。

另外有一点需要注意,发电商3在完全竞争条件下的第22时段的收益是-\$2661,这主要是因为机组爬坡率的限制使得发电商3在负荷大幅度下降的第22时段无法将自己的出力立刻降下来,最终导致自身收益在该时刻为负,但这样做的目的是为了使得发电商3在整个时间段内所获总收益最大。本质上讲,只要负荷变化程度足够大,即使在寡头垄断环境下也可能出现某些火电商因为爬坡率约束收益为负的情况。

4 结语

本文基于猜测供给函数提出了一种多时段水火电市场均衡模型。该模型同时考虑了网络约束、机组爬坡率约束及水电机组的用水量限制等。算例表明,网络约束对市场出清结果影响很大,机组爬坡率约束可能会使火电商在某些时段的收益为负。在寡头竞争环境下,火电商可通过减少其各时段出力来增加其收益,而受放水量限制的水电商则可通过减少高峰负荷时段发电量同时增加其他时段出力的方式来获取更大利益。

参考文献

[1] 吕尚泰,温信文.水电站概论[M].二版.北京:水利电力出版社,2008.
 [2] 张强.基于会计成本法的水电上网电价的定价[J].电力系统及其自动化学报,2008,20(4):113-119.
 ZHANG Qiang. Hydropower net pricing based on the accounting cost[J]. Proceedings of the CSU-EPISA,

2008, 20 (4) : 113-119.

[3] 丁军威, 胡扬, 夏清, 等. 竞价上网中的水电优化运行[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (3): 19-23.
DING Jun-wei, HU Yang, XIA Qing, et al. Hydro power optimization in competition with thermal generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (3): 19-23.

[4] Scott T J, Read E G. Modeling hydro reservoir operation in deregulated electricity market[J]. International Transactions in Operational Research, 1996, 3 (3-4): 243-253.

[5] 叶琳浩, 夏成军, 陈丽丹, 等. 改进遗传算法在韶关小水电群优化调度的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21 (3): 53-57.
YE Lin-hao, XIA Cheng-jun, CHEN Li-dan, et al. Application of optimal operation based on improved genetic algorithm for small hydropower stations in Shaoguan[J]. Proceedings of the CSU- EPSA, 2009, 21 (3): 53-57.

[6] 吴至复, 曾鸣, 刘宝华, 等. 定火电机组合方式下水火电系统动态优化调度电力市场中水火电优化调度模型及其应用[J]. 电网技术, 2006, 30 (15): 45-49.
WU Zhi-fu, ZENG Ming, LIU Bao-hua, et al. An optimum dispatching model of hydro-thermal power system in market environment and application[J]. Power System Technology, 2006, 30 (15): 45-49.

[7] Bushnell J. A mixed complementarity model of hydro-thermal electricity competition in the western united states[J]. Operations Research, 2003, 51 (1): 80-93.

[8] Villar J, Rudnick H. Hydrothermal market simulator using game theory: assessment of market power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (1) : 91-98.

[9] 袁智强, 侯志俭, 蒋传文, 等. 水火电系统古诺模型的均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 17-21.
YUAN Zhi-qiang, HOU Zhi-jian, JIANG Chuan-wen, et al. Analysis of cournot equilibrium of hydro thermal system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (4) : 17-21.

[10] 刘瑞丰, 王秀丽, 朱振青, 等. 水电厂参与市场竞争下的市场模拟及其市场力削弱[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (16) : 21-24.
LIU Rui-feng, WANG Xiu-li, ZHU Zhen-qing, et al. Hydrothermal power market simulating and the market power mitigation of hydro power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (16) : 21-24.

[11] Day C J, Hobbs B F, Pang J S. Oligopolistic competition in power networks: a conjectured supply function approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 17 (3) : 597-607.

[12] Hobbs B F. Linear complementarity models of nash-cournot competition in bilateral and POOLCO power markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16 (2) : 194-202.

[13] 朱成章. 水力发电概况—水力发电技术知识丛书第一分册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.

[14] Cottle R W, Pang J S, Stone R E. The linear complementarity problem[M]. Boston: Academic Press, 1992.

[15] Ferris C, Munson T S. Complementarity problems in GAMS and the PATH solver[R]. University of Wisconsin, 1998.

[16] Bautista G, Quintana V H. An oligopolistic model of the integrated market for energy and spinning reserve[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2006, 21 (1) : 132-142.

收稿日期: 2009-11-30; 修回日期: 2010-03-03

作者简介:

杨建林 (1980-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力市场、电力系统稳定分析; E-mail: yjlscttju@sjtu.edu.cn

耿静 (1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力市场、节能调度、电力系统无功优化;

严正 (1964-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为电力市场、电力系统稳定分析。

(上接第 19 页 continued from page 19)

[7] 刘敬, 吕立华. 基于模糊推理的PI控制器参数整定方法[J]. 控制工程, 2007, 14: 30-32.
LIU Jing, Lü Li-hua. Tuning method of PI controller based on fuzzy inference[J]. Control Engineering of China, 2007, 14: 30-32.

[8] Wei Qiao, Harley R G. Indirect adaptive internal neuro-control for a static synchronous series compensator (SSSC) connected to a power system[C]. //IEEE Industrial Electronics Society Conference. Atlanta (USA) : 2005.

收稿日期: 2010-02-03; 修回日期: 2010-04-15

作者简介:

张爱国 (1976-), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制;

韩军锋 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与分析;

蒋程 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动. E-mail: jc_2002@163.com