

计及处罚费率的AGC机组调配经济性研究

张光烈¹, 郭伟¹, 姜世金², 张野飙³

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012;

2. 鸡西供电公司, 黑龙江 鸡西 158100; 3. 齐齐哈尔供电公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161000)

摘要: 随着电力运营体制改革的不断深入和电力市场的逐渐形成, 维持电力系统的经济可靠运行显得越来越重要, 研究的重点也逐步转向了对辅助服务的有效获取和定价。通过对 AGC 机组的调配问题的研究, 介绍了一种考虑到联络线偏差的确定 AGC 容量需求的框架和在目前的电力市场机制下针对不同需要来处理调节分配的方法。最后引入算例, 通过与常规方法的比较, 验证了该模型的正确性和有效性。

关键词: 电力市场; 自动发电控制; 容量需求; 处罚费率

Research on AGC of units allotment considering penalty rates

ZHANG Guang-lie¹, GUO Wei¹, JIANG Shi-jin², ZHANG Ye-biao³

(1.School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2.Jixi Power Supply Company, Jixi 158100, China; 3.Qiqihaer Power Supply Company, Qiqihaer 161000, China)

Abstract: With the power industry of China is going to establish a market-based operational mechanism, it is more important to maintain system security an reliability while economically efficient transactions are accommodated in the power system. Meanwhile, restructuring has sharpened the appetite of generation owners for more efficient operation achieved by submitting auxiliary services as well as energy component. From the research of the deployment of AGC unit, a framework to determine AGC capacity requirement and to deal with regulation dispatch under uncertain demand in a competitive electricity market is presented in this paper. Furthermore, the numerical example is employed to validate correctness and effectiveness of the proposed algorithm, and the result based on this algorithm is compared with that based on conventional algorithm.

Key words: electricity market; automatic generation control; capacity requirement; penalty rates

中图分类号: TM73; F123.9

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2009)04-0049-05

0 引言

作为一种综合控制技术, 自动发电控制(AGC)被广泛应用于保持系统安全性和稳定性领域。特别是在维持电力系统频率、维持和控制联络线交换功率、分配发电出力方面起着重要的作用。由于种种原因, 一个区域性的电力系统需要通过联络线与邻近的区域电网进行能量交换, 为实现电网AGC的控制目标, 电网经营企业需要从发电市场中获取一定的AGC调节容量, 用以补偿各种随机事件引起的发电与负荷之间的实时偏差^[1]。从电能质量和联络线功率控制来看, AGC容量越多越好, 而从运行经济性考虑, AGC容量又不宜过多, 否则就会造成系统资源的浪费。传统做法上其大小主要根据系统负荷的变化和运行经验来确定, 一般取最大负荷的

2%~5%, 大系统取小值, 小系统取大值。这种基于运行经验确定AGC容量的做法, 不能很好地兼顾电网运行的可靠性和市场运营的经济性, 不适合电力市场的运营机制。因此, 在电力市场环境下如何确定兼顾经济性和安全性的AGC容量, 对维护电力系统的安全可靠运行十分重要。美国联邦能源管制委员会(FERC)所提出的标准化市场设计(SMD)中就特别强调在维护系统安全可靠运行的前提下, 应合理地AGC容量进行获取和定价, 以便能调动发电公司参与AGC调节的积极性^[2]。文献[3]从调节成本最小化的角度出发确定电力市场环境下的AGC最优调节出力。文献[4]考虑到发电机组实际跟踪调度指令的能力并不一致, 从而建立了基于概率学的AGC跟踪能力和服务质量的后验考核指标及结算方法。文献[7]构建了发电侧电力市场中AGC机组的

调配框架,讨论了如何确定AGC容量和所需调节速率的问题。

很明显,AGC机组调配经济性的研究可以对辅助服务市场产生重大的影响。美国PJM电力市场和新英格兰电力市场的调度员都是根据经验确定AGC容量需求的。在PJM电子库中,AGC容量需求是按系统总装载的1%,在新英格兰电子库中有一个AGC容量需求经验表。另外,如果一个区域的电力系统不能按照已有的标准提供AGC服务,必须对其进行处罚。要准备充分的AGC调节容量方案以便很好地执行AGC服务。本文尝试将模型建立在随机理想化概念之上的,把AGC处罚和负载的不确定性都考虑进去,建立AGC容量获取和调度的数学模型,并用一个算例进行了说明。

1 负荷与AGC调节特性

在电力系统中,电网负荷经常会出现预测不准的情况,导致电网的供给能力不能满足系统负荷的要求,这样在发电和用电之间就会产生偏差,在AGC运作的时候就会自动增加或者是减少产生输出来达到平衡。令 N 代表电力系统中具有AGC调节能力的机组台数。以第 i 台($i \in N$)AGC机组为例,其申报的调节性能参数应包括调节速率,调节容量上限 \bar{A}_i ($\bar{A}_i \leq \bar{P}_{G,i}$, $\bar{P}_{G,i}$ 为装机容量)和调节容量下限 \underline{A}_i ($\underline{P}_{G,i} \leq \underline{A}_i$, $\underline{P}_{G,i}$ 为最小技术出力)。令 τ 表示给定允许的调节时间,则上调容量 A_i^+ 和下调容量 A_i^- 必须满足:

$$A_i^+ \leq \tau \times v_i \quad A_i^- \leq \tau \times v_i \quad (1)$$

若第 i 台机组的AGC基点出力为 $P_{ED,i}$,则AGC容量必须满足如下约束(如图1所示):

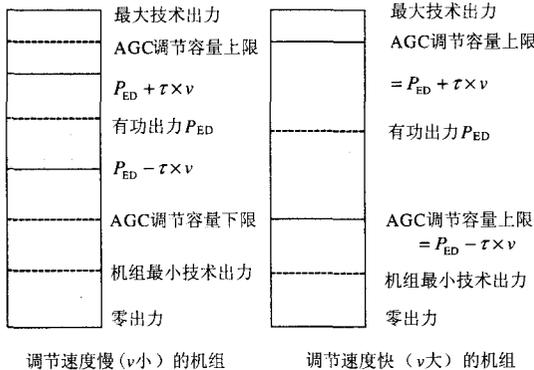


图1 AGC调节特性示意图

Fig.1 Illustration of AGC regulation capability

$$\begin{cases} A_i^+ + P_{ED,i} \leq \bar{A}_i \\ A_i^- + \underline{A}_i \leq P_{ED,i} \end{cases} \quad (2)$$

为叙述方便,进行如下假设,允许每台机组作为一个AGC服务体进入辅助服务市场(结果可以被扩展成处理多个发电公司共同参与的情形),要求所有发电机组申报一个AGC容量段,从式(1)和式(2)可得出AGC上调、下调容量为:

$$\begin{cases} A_i^+ = \min\{\tau v_i, \bar{A}_i - P_{ED,i}\} \\ A_i^- = \min\{\tau v_i, P_{ED,i} - \underline{A}_i\} \end{cases} \quad (3)$$

如果选择第 i 台机组提供AGC服务,那么它实际的调节功率需求 $\Delta P_{G,i}$ 必须满足:

$$\begin{aligned} 0 \leq \Delta P_{G,i} \leq A_i^+ \quad (\text{上调}) \\ A_i^- \leq \Delta P_{G,i} \leq 0 \quad (\text{下调}) \end{aligned} \quad (4)$$

要使电力系统能够稳定运行则要从满足上述约束条件的机组中获取AGC的上调容量 R_A^+ 和下调容量 R_A^- ,以消除系统供给和实际负荷需求之间的偏差。偏差 ΔT 为系统负荷 D 偏离所有机组的基点出力的偏差容量,给定

$$\Delta T = D - \sum_{i \in N} P_{ED,i}$$

ΔT 是一个随机量,其不确定性与负荷的不确定性相一致。令 ΔT 的概率密度函数是 $\varphi_{\Delta T}(x)$ ^[8]。

如果只考虑负荷不确定性,在系统运行中会有下面三种情形:

- (1) $\Delta T \leq -R_A^-$;
- (2) $-R_A^- \leq \Delta T \leq R_A^+$;
- (3) $R_A^+ \leq \Delta T$

第一种情形下,系统获取的AGC下调容量不足,导致发电大于负荷,电网频率上升,联络线关口偏差ACE可能超出CPS标准允许范围而受到惩罚。令 $\rho(\Delta T \leq -R_A^-)$ 的概率为:

$$\rho(\Delta T \leq -R_A^-) = \int_{-\infty}^{-R_A^-} \varphi_{\Delta T}(x) dx$$

第二种情形下,系统获取的AGC调节容量充裕,所辖范围内的负荷波动及联络线上交换功率变化将由AGC调整相关机组的发电功率来平衡,将系统频率偏差和联络线功率偏差控制在允许范围之内,因此有:

$$\sum_{i \in \Omega} \Delta P_{G,i} - \Delta P_{tie} - \Delta P_{Loss} = 0 \quad (5)$$

式中: ΔP_{tie} 是联络线偏差, ΔP_{loss} 是系统网损的增量。

第三种情形,系统获取的AGC上调容量不足,导致发电功率小于负荷需求,电网频率下降,联络线偏差ACE可能无法满足CPS标准要求而受到惩罚。令 $\rho(R_A^+ \leq \Delta T)$ 的概率是

$$\rho(R_A^+ \leq \Delta T) = \int_{R_A^-}^{+\infty} \varphi_{\Delta T}(x) dx$$

在负荷不确定的时候, 机组自身因素也会影响 AGC 服务的水平。令 k 代表 AGC 机组的性能因素。假设 AGC 机组不会产生过调, $k \in [0, 1]$ 。当 $k=1$ 的时候, 机组可以按计划提供 AGC 服务; 当 $k=0$ 的时候, 机组不能按计划提供 AGC 服务。显然, 实际调度的 AGC 调节出力 $\sum_{i \in \Omega} \Delta P_{G,i}$ 是 k 的增函数。

明显的, AGC 上调发生的概率:

$$\rho(\Delta T \geq 0) = \int_0^{+\infty} \varphi_{\Delta T}(x) dx$$

需要调度的 AGC 机组实际调节出力

$$\sum_{i \in \Omega} \Delta P_{G,i} = k \min\{\Delta T, R_A^+\} \quad (6)$$

类似的, AGC 下调发生的概率:

$$\rho(\Delta T \leq 0) = \int_{-\infty}^0 \varphi_{\Delta T}(x) dx$$

需要调度的 AGC 机组实际调节出力

$$\sum_{i \in \Omega} \Delta P_{G,i} = k \max\{\Delta T, -R_A^-\} \quad (7)$$

2 AGC 机组调配的理想随机模型

调度中心所关心的, 是对适当的 AGC 容量需求和 AGC 容量分配方案, 在满足系统稳定运行的前提下, 如何使购买 AGC 服务费用最小。AGC 辅助服务的成本包括 AGC 的采购费用和支付给发电公司的惩罚费用。为了描述 AGC 的理想模型, 下面假设:

(1) 假设从能量市场上购买的电能采用统一市场出清价格 (MCP) 支付。在预调度阶段, 市场运营机构根据发电公司的报价数据先进行电能市场的预调度, 确定各个发电公司的预调度电量 $P_{ED,i}$ 和相应的市场出清价格 p , 于是购电成本为 $\sum_{i \in N} p P_{ED,i}$ 。

(2) 如果考虑 AGC 服务成本的话, 该成本包括 AGC 控制设备的投资和维护成本、AGC 机组的维修费用和 AGC 投运期间的机会成本。令 $C_A^+(R_A^+)$ 和 $C_A^-(R_A^-)$ 分别为支付给发电公司的 AGC 上调和下调容量费用。其应该分别为所获取容量 R_A^+ 和 R_A^- 的单调递增函数。发电机组一旦被调用参与 AGC 调节, 还应支付其能量费用, 这应由机组的电量报价曲线和 AGC 的实际调节出力决定, 即:

$$e_i(\Delta P_{G,i}) = [a_i(P_{ED,i} + \Delta P_{G,i}) + b_i] |\Delta P_{G,i}| \quad (8)$$

这里 a_i 和 b_i 是机组 i 的电量报价系数。

(3) 评估 AGC 性能有两个标准, 由 NERC 制定

的 CPS1 和 CPS2 标准。AGC 性能处罚也基于这两个标准, 因为这两个标准是统计学数据, 他们不能直接用于理想模型。但是, 它们和调节能力 $|\Delta T - \sum_{i=1}^N \Delta P_{G,i}|$ 有关。因此, 我们假设 AGC 性能

处罚 Γ_{pen} 是 $|\Delta T - \sum_{i=1}^N \Delta P_{G,i}|$ 的线型函数表示如下:

$$\Gamma_{pen} = \begin{cases} \eta^+ [\Delta T - k R_A^+], & R_A^+ < \Delta T \\ \eta^- [\Delta T - k R_A^-], & R_A^- < \Delta T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中: η^- 和 η^+ 分别是上调和下调容量不足所引起的联络线偏差处罚费率。

AGC 容量需求的确定和分配问题可以看作是一个以能量和 AGC 购买成本总数最小为目的的理想问题, 在单个交易时段的电力市场运营机构的目标函数为:

$$\min_{\Delta P_{G,i}, R_A^+, R_A^-} E \left\{ \sum_{i \in N} p P_{ED,i} + C_A^+(R_A^+) + C_A^-(R_A^-) + \sum_{i \in \Omega} e_i(\Delta P_{G,i}) + \Gamma_{pen} \right\} \quad (10)$$

s.t. AGC 调节出力平衡约束 (式 (6)、(7))

交换功率偏差约束 (式 (5))

上面理想模型的目的是为了选取合适的上调容量 R_A^+ 、下调容量 R_A^- 、实际调节功率 $\Delta P_{G,i} (i \in \Omega)$, 使得成本为最小。

基于以上的介绍的 AGC 容量需求确定方法, 有如下建议。首先, 根据历史数据, 考察典型日 (频率和联络线功率不越限) 机组历史发电数据, 对 AGC 机组的调节功率 (上升或下降功率) 及其变化率进行统计分析, 从而确定系统对 AGC 容量和速率的需求, 一旦确定了系统所需的 AGC 容量 R_A^+ 和 R_A^- , 电力市场运营机构可按如下原则从参与 AGC 市场的机组 ($i \in \Omega$) 中获取合适的 AGC 机组及其调节容量: ① 优先选取 AGC 调节容量费用低的机组; ② 若容量费用相同, 优先选取 AGC 调节性能高的机组。很明显, 假设没有统一的性能指标, 分配方案可以解决经济上的问题。模型流程如图 2 所示。

3 算例分析

设有 9 台机组参与能量市场和 AGC 辅助服务市场的竞争, 每台机组隶属于一家发电公司。发电公司根据所发布的市场信息提交 AGC 容量报价和机组调节性能参数, 如表 1 所示。

取 $\delta=1$ 和 $k=0.95$ 。假设系统负载 D 遵循正态分

布, 即 $D \sim N(\mu, \sigma^2)$, $\mu=1030(\text{MW})$, $\sigma=28$ 。首先进行能量市场的预调度, 各机组在能量市场上的调度出力由表 1 中 $P_{ED,i}$ 给出, 市场出清价格是 \$ 157.9/\text{MWh},

假设实际负荷比预测值高 56/MW, 接下来是 AGC 容量调节实时分配的迭代过程。

表 1 AGC 机组参数和报价数据
Tab.1 Data of the numerical example

机组序号	$(P_{ED,i})/\text{MW}$	$(\tau \times v_i)/\text{MW}$	$(\bar{P}_{G,i}, \underline{P}_{G,i})/\text{MW}$	$(\bar{A}_i, \underline{A}_i)/\text{MW}$	(a_i, b_i)
1	184	15	(200,60)	(198,134)	(0.006,3.1)
2	180	18	(200,72)	(196,120)	(0.008,4.0)
3	332	20	(350,110)	(350,290)	(0.006,2.4)
4	232	7	(250,80)	(246,180)	(0.012,3.1)
5	112	12	(135,95)	(135,95)	(0.009,3.8)
6	302	20	(320,118)	(320,210)	(0.006,4.3)
7	215	15	(250,80)	(246,180)	(0.012,3.1)
8	120	7	(135,95)	(135,95)	(0.009,3.8)
9	131	12	(160,92)	(160,121)	(0.018,2.3)

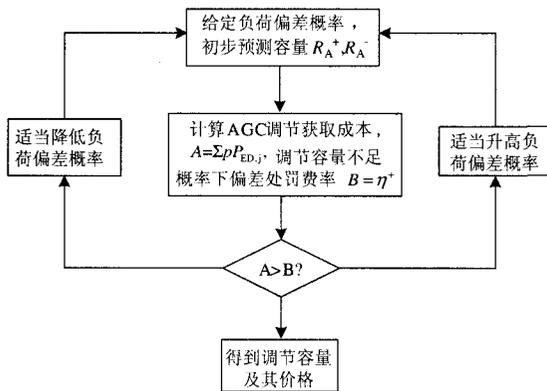


图 2 AGC 容量预测流程

Fig.2 Flow chart of AGC capacity requirement

理想调节 ΔP_{Gi} 可以从表 2 中获得, 可得到此种情况下 AGC 边际调节出力价格 $\bar{\theta}$ 为 \$ 5.29/MWh。在结算时除对获取的 AGC 机组支付容量费用外, 还要对实际运行中提供调节服务的 AGC 机组补偿其调节出力费用, 于是, 电力市场运营机构支付的总的 AGC 辅助服务费用为 \$ 240.87, 总购电费用为 \$ 4519.06。根据这些数据, 由 AGC 调节容量的获取策略可以方便地得到 AGC 上调、下调容量需求 R_A^+ 、 R_A^- 均为 64 MW。在此前提下得到被选中的 AGC 机组结果见表 2。上调容量边际清算价格 $\bar{\lambda}_r^+$ 是 \$ 3.5/MWh, 上调容量边际清算价格 $\bar{\lambda}_r^-$ 是 \$ 1.5/MWh。

同等约束条件, 在不考虑处罚费率的情况下电力市场运营机构支付的总的 AGC 辅助服务费用为 \$ 341.84, 总购电费用为 \$ 5 663.24。算例结果表明采用本文提出的 AGC 机组调配方案可以在满足系统容量等要求的前提下选中性能较优的机组, 有利于降低整个系统的 AGC 容量购置费用。

表 2 AGC 机组调节容量和调度出力

Tab.2 Results of procurement and dispatching of AGC capacity

序号	$(A_i^+)/\text{MW}$	$(A_i^-)/\text{MW}$	$\Delta P_{Gi}/\text{MW}$	$\Pi_i/\text{美元}$
1	15(4)	15(3)	12.8	1 109.325
2	14(5)	18(4)	9.2	1 129.569
3	18(3)	20(2)	10.2	635.786
4	15(2)	7(5)	15.0	996.350
5	7(1)	12(1)	7.0	648.030

(括号内数字表示获取次序 Π_i 为机组购电费用)

4 结论

AGC 服务作为电力系统频率控制的主要技术手段, 其成本对辅助服务乃至整个电力系统的运行成本有着重要的影响。而 AGC 服务作为辅助服务的最主要部分, 让其参与电力市场的竞争也是一种必然趋势。本文在考虑了现行电力市场运营体制的前提下, 在决策目标中综合考虑了由负荷需求的不确定性和 AGC 机组实际跟踪调度指令的偏差所引起的联络线功率偏差处罚费率, 建立了 AGC 容量获取和调节的数学模型。算例证明, 基于该模型可以得到兼顾系统可靠性和经济性的 AGC 容量。同时, 利用该模型所得到的调度调节算法可以对获取的 AGC 容量进行有效配置, 从而降低 AGC 容量购置费用。

参考文献

- [1] Rashidinejad M, Song Y H, Javidi. Contingency Reserve Pricing Via a Joint Energy and Reserve Dispatching Approach[J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43: 537-548.
- [2] 钱玉姝, 崔恒志, 等. 适应CPS标准的AGC系统设计与

- 应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(11): 69-70.
QIAN Yu-shu, CUI Heng-zhi, et al. Design and Application of AGC System Adapting to CPS Standard[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(11):69-70.
- [3] 李瑞超, 江山立, 陈家庚, 等. AGC机组调节效能定量评估与补偿方式研究[J]. 电网技术, 2001, 25(8): 15-19.
LI Rui-chao, JIANG Shan-li, CHEN Jia-geng, et al. Quantitative Evaluation of Regulation Efficiency of Generating Sets with AGC and Study on the Compensation Modes[J]. Power System Technology, 2001, 25(8):15-19.
- [4] 言茂松, 邹斌. 概率学的AGC先验定价和后验考核新方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 1-6.
YAN Mao-song, ZOU Bin. A New Method of Probability Prior Pricing and Posterior Assessment for AGC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(2): 1-6.
- [5] 武亚光, 李卫东, 吴海波, 等. 我国发电侧电力市场中AGC机组的调配框架[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 37-40.
WU Ya-guang, LI Wei-dong, WU Hai-bo, et al. Framework of AGC Unit Selection on the Generation-sided Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(2): 1-6.
- [6] 徐兴伟, 林伟. 互联电网控制性能标准下自动发电控制策略的选择[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 32-34.
XU Xing-wei, LIN Wei. Selection of Automatic Generation Control Strategy Under Control Performance Standard for Interconnected Power Grids[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 32-34.
- [7] 丁玉凤. 粒子群优化算法及其在电力系统经济运行中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
DING Yu-feng. Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications to Power System Economic Operation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [8] 郑延海, 张小白, 钱玉妹, 等. 电力系统实时安全约束调度的混合算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 49-52.
ZHENG Yan-hai, ZHANG Xiao-bai, QIAN Yu-mei, et al. Hybrid Algorithm for Real-time Security Constrained Dispatch of Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 49-52.
- [9] 赵学顺, 甘德强, 文福拴, 等. 计及联络线功率偏差处罚的AGC容量获取与调节策略[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(23): 18-20.
ZHAO Xue-shun, GAN De-qiang, WEN Fu-shuan, et al. Determination of AGC Capacity Requirement and Regulation Strategies Considering Penalties of Tie-line Power Flow Deviations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(23):18-20.

收稿日期: 2008-04-16

作者简介:

张光烈(1965-), 男, 研究方向为电力系统控制;

郭伟(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场; E-mail: piazi_99@163.com

姜世金(1970-), 男, 主要从事电力系统运行与控制方面的研究。

(上接第 48 页 continued from page 48)

- [5] 邓建国. 三相异步电动机瞬间断电重合闸瞬态分析[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(1):37-41.
DENG Jian-guo. Transient Analysis on Reclosing of Three-phase Asynchronous Motor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(1):37-41.
- [6] 黄滨, 张晓锋, 邓大新. 舰船电力系统转换供电重合闸的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 28(3):318-321.
HUANG Bin, ZHANG Xiao-feng, DENG Da-xin. Modeling and Analyzing of Switch Supply's Reclosing in Warship's Power System[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 28(3):318-321.
- [7] 汤晓燕. 三相感应电动机瞬态断电重新投入电网时的瞬态[J]. 电机与控制学报, 2001, 5(2):98-102.
TANG Xiao-yan. Reclosing Transient of Three-phase Asynchronous Motor[J]. Electric Machines and Control, 2001, 5(2):98-102.
- [8] Shaltout A, Al-omoush M. Reclosing Torques of Large Asynchronous Motors with Stator Trapped Flux[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1996, 11 (1):84-90.
- [9] Beckwith T R, Hartmann W G. Motor Bus Transfer: Considerations and Methods[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2006, 42(2):602-611.
- [10] Woudstra J B, Ddlerli W. Re-switching of an Asynchronous Motor with Remainder Flux[A]. In: Third International Conference on IEEE Power Electronics and Variable-Speed Drives[C]. 1988.452-455.

收稿日期: 2008-04-17; 修回日期: 2008-07-10

作者简介:

高吉增(1983-), 男, 调度专工, 从事继电保护与运行方式工作; E-mail: cumtyy1@126.com

杨玉磊(1982-), 男, 硕士研究生, 从事继电保护、电机节能控制研究;

崔学深(1973-), 男, 副教授, 从事电力系统稳定性、电机控制与节能技术方面的研究。