

考虑通信中断的互联电网自动发电控制策略

齐浩宇, 张俊芳

(南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094)

摘要:传统自动发电控制(AGC)仅仅考虑了经济因素。然而互联电网存在通信中断的隐患,可能发生AGC控制信号阻塞现象,进而导致控制单元无法根据负荷的变化调整机组出力。文中从经济调度(ED)和负荷频率控制(LFC)两方面进行改进,提出一种考虑通信中断概率的、具有预防性的AGC策略来降低通信中断带来的影响。经济调度根据负荷预测,针对长期、大幅的负荷波动,尽可能地利用通信中断概率较高的机组进行调节。负荷频率控制根据机组风险评估,针对短期、不可预测的小幅负荷波动,利用风险较低的机组进行调节。IEEE 118节点系统仿真表明,所提出的新AGC策略可以提高系统的动态稳定性,并且有较好的经济性和工程实用价值。

关键词:自动发电控制;经济调度;负荷频率控制;通信中断概率;风险评估

中图分类号:TM76

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2016)06-0005-04

随着电网规模的扩大,电力系统对通信可靠性的依赖日益加强。电网调度自动化系统需要通过通信采集各个厂站的实时信息,监视系统的运行状态,并发送各种操作命令^[1-3]。可以说,通信是调度自动化系统和电网安全稳定控制系统的基础,是现代电力系统不可缺少的一部分。传统的AGC策略只是追求成本最低,并没有考虑通信中断的问题^[4]。一旦传输线路发生通信中断,要下发的指令就无法按时传递到该线路上的机组,该台机组只能保持之前的出力,无法根据负荷变化进行调节^[5-8]。为了提高自动发电控制的动态稳定性和经济性,本文根据通信中断概率,提出了一种针对性的、预防性的AGC策略,分别从ED和LFC两方面进行研究。

针对长期、大幅的负荷波动,经济调度根据可靠地负荷预测,判断下一个时段的负荷波动趋势。在目标函数中加入带有通信中断概率的惩罚项,来修正机组的分配系数。让通信中断概率高的机组尽可能地用尽各自的调节裕度,防止出现通信中断后机组只能保持之前的出力,丧失调节的能力,造成电力系统的调节裕度不足。针对短期、不可预测的小幅负荷波动,负荷频率根据机组的风险评估,使风险较低的机组尽可能多地承担。在通信中断来临前,本文提出的策略已经根据通信中断概率、风险及剩余调节裕度对各机组的出力进行了预防性地调整,增加系统对负荷波动的调节能力又降低运行成本。

1 经济调度控制策略

1.1 传统的经济调度控制策略

机组发电成本为^[9]:

$$C(P_{i\text{plan}}) = a_i + b_i P_{i\text{plan}} + c_i P_{i\text{plan}}^2 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

式(1)中: a_i, b_i, c_i 分别为机组*i*发电成本函数的常数项系数、一次项系数、二次项系数; $P_{i\text{plan}}$ 为机组*i*计划出力。

目标函数:

$$\min f(P_{i\text{plan}}) = \sum_{i=1}^N (a_i + b_i P_{i\text{plan}} + c_i P_{i\text{plan}}^2) \quad (i = 1, \dots, N) \quad (2)$$

约束条件有功平衡:

$$\sum_{i=1}^N P_{i\text{plan}} = P_{\text{Dplan}} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

出力上下限:

$$P_{i\text{min}} \leq P_{i\text{plan}} \leq P_{i\text{max}} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

式(3,4)中: P_{Dplan} 为系统预测总负荷; $P_{i\text{max}}, P_{i\text{min}}$ 为机组*i*的出力上、下限。

1.2 考虑通信中断概率的经济调度控制策略

考虑通信中断概率的经济调度控制策略是针对长期、大幅的负荷波动,为了达到更好的效果,本策略需要依靠较为准确地负荷预测。当不存在负荷波动时,机组保持出力不变。

(1) 负荷波动趋于有功增加。在目标函数中添加惩罚项后修改为:

$$\min f(P_{i\text{plan}}) = \min \sum_{i=1}^N [a_i + b_i P_{i\text{plan}} + c_i P_{i\text{plan}}^2 + \frac{P_{i\text{plan}}}{P_{\Sigma}(k_i \alpha_i + l_i)}] = \min \sum_{i=1}^N [a_i + (b_i + \frac{P_{i\text{plan}}}{P_{\Sigma}(k_i \alpha_i + l_i)}) P_{i\text{plan}} + c_i P_{i\text{plan}}^2] \quad (5)$$

式(5)中: α_i 是机组*i*的通信中断概率; P_{Σ} 是系统的基础负荷; k_i 和 l_i 是惩罚项调节系数。

该惩罚项权衡了每台机组的出力在总出力中所占的比例,并且可以经过整理与目标函数的一次项系数合并。通信中断概率高的机组尽可能多地承担基础负荷,让通信中断概率低的机组保留较大的上调裕度。防止出现通信中断后,出现正向负荷波动,中断机组出力

保持不变,通信未中断的机组上调裕度不足。

(2) 负荷波动趋于有功减少。将式(5)中的 α_i 用 $1-\alpha_i$ 替代,目标函数修改为:

$$\min f(P_{i\text{plan}}) = \min \sum_{i=1}^N \{a_i + b_i P_{i\text{plan}} + c_i P_{i\text{plan}}^2 + \frac{P_{i\text{plan}}}{P_{\Sigma} [k_i (1-\alpha_i) + l_i]}\} = \min \sum_{i=1}^N \{a_i + \{b_i + \frac{P_{i\text{plan}}}{P_{\Sigma} [k_i (1-\alpha_i) + l_i]}\} P_{i\text{plan}} + c_i P_{i\text{plan}}^2\} \quad (6)$$

使通信中断概率低的机组尽可能多地承担基础负荷,让通信中断概率低的机组保留较大的下调裕度。防止出现通信中断后,出现负向负荷波动,中断机组出力保持不变,通信未中断的机组下调裕度不足。

2 负荷频率控制策略

2.1 传统的负荷频率控制策略

传统的负荷频率控制策略根据经济调度的比例进行分配出力,分配系数为^[10,11]:

$$K_{i\text{LFC}} = \frac{P_{i\text{ED}}}{\sum P_{i\text{ED}}} \quad (7)$$

式(7)中: $P_{i\text{ED}}$ 为机组*i*根据经济调度所分配的出力。

2.2 考虑通信中断概率的负荷频率控制策略

考虑通信中断概率的负荷频率控制策略针对的是短期、不可预测、小幅的负荷波动,根据各机组的风险评估和剩余调节裕度对机组进行出力分配。机组*i*的风险表示为:

$$r_{i\text{risk}} = (C_{i\text{without}} - C_{i\text{normal}}) \times a_i \quad (8)$$

式(8)中: $C_{i\text{without}}$ 是机组*i*出现通信中断后总的发电成本,该机组丧失调节裕度,原本应该进行的调节量由其他机组承担; $C_{i\text{normal}}$ 是所有机组不出现通信中断的总发电成本。

机组出力分配系数修改为:

$$K_{i\text{LFC}} = P_{i\text{ED}} \times (1 - \frac{r_{i\text{risk}}}{\sum r_{i\text{risk}}}) \times \frac{P_{i\text{left}}}{\sum P_{i\text{left}}} \quad (9)$$

$$P_{i\text{left}} = \min \{P_{i\text{max}} - P_{i\text{now}}, P_{i\text{now}} - P_{i\text{min}}\} \quad (10)$$

式(9,10)中: $P_{i\text{now}}$ 为机组*i*的当前出力; $P_{i\text{left}}$ 为机组*i*的剩余调节裕度,取机组*i*的出力上限减去当前出力(上调裕度)与当前出力减去机组*i*出力下限(下调裕度)中的最小值。风险较低和剩余调节裕度较多的机组更多参与负荷波动调节。

3 考虑机组通信中断的自动发电控制策略

通过考虑各机组通信中断的概率,提出如下自动发电控制策略。

(1) 基于较为准确的负荷预测判断用户负荷是趋于有功增加还是趋于有功减少,并计算考虑机组通信

中断概率后的机组发电成本。

(2) 根据考虑机组通信中断概率的经济调度控制策略针对长期、大幅的负荷波动对各机组的出力进行分配,使系统尽可能保留较大的调节裕度。

(3) 通过各个机组是否发生通信中断情况下得到的发电总成本差和机组通信中断概率得到各机组的风险值,并计算出各机组的剩余调节裕度。

(4) 根据考虑机组通信中断概率的负荷频率控制策略针对短期、小幅的负荷波动进一步对各机组的出力进行调整。

4 仿真与分析

4.1 仿真系统

为了比较新控制策略和传统控制策略效果,在 Simulink 中建立 IEEE-118 节点系统验证其有效性。该系统分为 3 个区域,共有 54 台机组,都采用联络线偏差控制(TBC)。其中区域 2 与区域 1 和区域 3 互联,区域 1 和区域 3 不互联。在区域 1 中设置负荷波动,本区域有 15 台机组,其中机组 1,5,6,8,10 的通信中断概率较高,且惩罚项调节系数 $k_i=0.003$, $l_i=0.0001$ 。区域 1 的部分机组参数如表 1 所示。

表 1 区域 1 部分机组参数

机组 编号	通信中 断概率	机组发电成本系数			出力上限 $P_{\text{max}} / \text{MW}$	出力下限 $P_{\text{min}} / \text{MW}$
		$a / \text{元}$	$b / \text{元}$	$c / \text{元}$		
1	0.7	10.15	17.82	0.01	100	25
2	0.1	31.67	26.24	0.07	30	5
8	0.8	10.15	17.82	0.01	100	25
11	0.2	32.96	10.76	0.01	350	100
13	0.05	31.67	26.24	0.07	30	8
15	0.1	10.15	17.82	0.01	100	25

4.2 算例分析

算例 1 检验经济调度控制策略的效果,针对长期稳定、可预测并且幅值较大的负荷波动,负荷波动设置为趋于有功增加。算例 2 检验负荷频率控制策略的效果,针对短期、频率较高、波动趋势不可预测且幅值较小的负荷波动,负荷波动设置为先增后减。

4.2.1 算例 1

在 50.5 s 时设置一个 1300 MW 的正向负荷波动,所有机组保持通信正常。在 51 s 时,机组 1,5,6,8,10 出现通信中断,保持之前的出力。

区域 1 的频率偏差如图 1 所示。本文所提出的 AGC 控制策略使频率偏差更加接近于 0,并且传统控制策略下的频率偏差已经超出了我国电力系统的正常频率偏差的允许值 $\pm 0.2 \text{ Hz}$ 。为了对比效果明显,负荷波动设置较大,导致在调节后仍存在频率偏差。

区域 1 部分机组在 50.5 s (正向负荷波动发生之前)和 100 s (终止时间)的出力如表 2 所示。

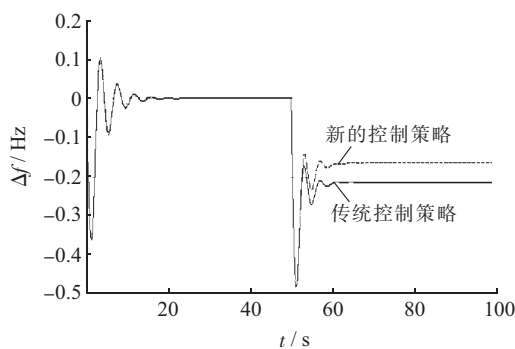


图1 区域1的频率偏差

表2 区域1机组出力

时间/s	机组	传统控制策略/MW	新的控制策略/MW
50.5	1	25	25
	2	5	5
	8	25	25
	11	350	100
	13	8	8
	15	25	25
100	1	25.76	25.75
	2	30	17.02
	8	25.76	25.75
	11	350	340.34
	13	30	27.23
	15	100	85.08

经计算,传统的 AGC 控制下总的上调裕度为 314 MW,本文所提出的 AGC 控制下总的上调裕度为 564 MW。传统 AGC 控制的成本为 22 509 元,本文所提出的 AGC 控制的成本为 24 643 元。后者的出力比前者多 160 MW,由于传统的 AGC 控制策略下的机组调节能力有限,这部分出力差额要从邻区购买。假定这部分成本按本区域成本最高的机组计算,而在实际的电力交易计划中这部分成本甚至更高。那么传统 AGC 控制的成本修改为 28 507 元。因此本文所提出的 AGC 控制的成本比传统的 AGC 控制的成本降低了 13.5%。

4.2.2 算例 2

在 50.5 s 和 51.5 s 分别设置一个 200 MW 的正向波动和 100 MW 的负向波动,其他仿真条件不变。

区域 1 的频率偏差如图 2 所示。由于负荷波动设置较小,2 种策略下的曲线比较接近。仍旧可以看出本文所提出的 AGC 控制策略使得频率偏差更快趋于稳定。

区域 1 部分机组在 51.5 s (负向负荷波动发生之前)和 100 s(终止时间)的出力如表 3 所示。

经计算,传统的 AGC 控制下总的下调裕度为 256 MW,本文所提出的 AGC 控制下总的下调裕度为 257 MW。传统的 AGC 控制的成本为 13 375 元,本文所提出 AGC 控制的成本为 13 398 元。2 种控制的最终总

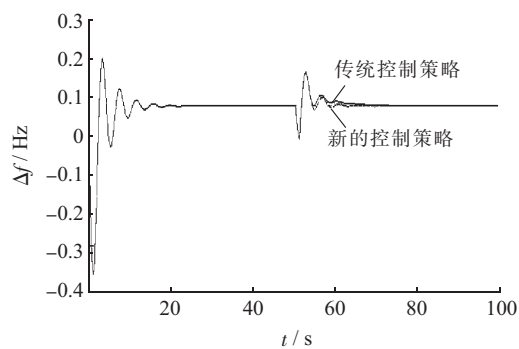


图2 区域1的频率偏差

表3 区域1机组出力

时间/s	机组	传统控制策略/MW	新的控制策略/MW
50.5	1	25	25
	2	5	5
	8	25	25
	11	221.090	350
	13	8	8
	15	25	25
100	1	25	25
	2	5	5
	8	25	25
	11	100	100
	13	8	8
	15	25	25

出力相同,虽然本文所提出的 AGC 控制成本升高了 0.2%,仍在可接受范围内,并且有更好地调频效果。

5 结束语

本文提出了一种考虑通信中断概率并具有预防性的 AGC 控制策略来提高电力系统调频的动态稳定性。分别从 AGC 的经济调度和负荷频率控制两方面对传统的控制策略进行改进。在经济阶段,针对长期稳定、可预测并且幅值较大的负荷波动,满足基础负荷后,让通信中断概率低的机组保留更多的调节裕度。在负荷频率控制阶段,针对短期、不可预测、幅值较小的负荷波动,让风险较低和剩余调节较高的机组尽可能多地参与负荷波动的调节。从而大大降低了电力系统通信中断带来的负面影响。仿真结果表明,在存有通信中断隐患的情况下,本文所提出的 AGC 控制策略与传统的 AGC 控制策略相比可以使系统频率误差变得更小,并且有良好的经济性和工程实用性。

参考文献:

- [1] 付鹏武,周念成,王强钢,等. 基于时滞模型预测控制算法的网络化 AGC 研究[J]. 电工技术学报,2014,29(4): 188-195.
- [2] 段献忠,何飞跃. 考虑通信延迟的网络化 AGC 鲁棒控制器设计[J]. 中国电机工程学报,2006,26(22):35-40.
- [3] 刘梅招,杨莉,甘德强,等. 存在均匀通信时滞的 AGC 稳定极限计算[J]. 电力系统自动化,2006,30(9):7-12.

- [4] 周念成,付鹏武,王强钢,等. 基于模型预测控制的两区域互联电网 AGC 系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012,40(22): 46-50.
- [5] 周红英. AGC 新模式下协调控制系统的分析及改进[J]. 华北电力技术,2010(4):32-36.
- [6] 王 芳. AGC 系统控制策略优化分析[J]. 河北电力技术, 2012(31):46-48.
- [7] 杨 平,庞佳玲,张志雄. 互联电网 AGC 控制模式研究[J]. 上海电力学院学报,2011,27(2):139-142.
- [8] 巴 宇,吕 泉,常烨燊,等. 基于频差预期控制性能标准下的自动发电控制策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(8): 74-79.
- [9] 滕贤亮,高宗和,朱 斌,等. 智能电网调度控制系统 AGC 需求分析及关键技术[J]. 电力系统自动化,2015,39(1):81-87.
- [10] 赵 川,朱 涛,叶 华,等. 多控制区协调自动发电控制的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制,2014(16):46-51.
- [11] 夏天宇,李 辰,柳 进,等. 基于超短期负荷预测的 Non-AGC 与 AGC 协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(18):38-43.

作者简介:

齐浩宇(1990),男,吉林长春人,硕士研究生,从事电力系统稳定控制研究工作;

张俊芳(1965),女,陕西武功人,副教授,从事电力系统运行研究工作。

AGC Strategy Considering Communication Outage for Interconnected Power Grids

QI Haoyu, ZHANG Junfang

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The conventional automatic generation control (AGC) strategy only takes the economic factors into consideration. However, for interconnected power grids, the hidden failure of communication outage may cause AGC control signal blocks followed by control units' inability of power adjustment with the load fluctuation. In this paper, a novel AGC strategy was proposed to improve the conventional one by taking both strategy of economic dispatch (ED) and load frequency control (LFC) into consideration. The novel AGC strategy has considered the communication outage probability and was prophylactic, so that it could let the impact of communication outage down. The ED control of the novel AGC strategy was designed against the long-term substantial load fluctuation by adjusting the power of those AGC units with high communication outage probability according to the load forecasting as much as possible. While the LFC strategy of the novel AGC strategy was designed against short-term and unpredictable slight load fluctuation by adjusting the power of those AGC units with low communication outage risk. The IEEE-118 system is employed to verify the effectiveness of the novel AGC strategy. The simulation results indicate that the novel control strategy has the ability of improving the dynamic stability of power system, excellent economy and engineering application value.

Key words: automatic generation control; economic dispatch; load frequency control; communication outage probability; risk assessment

(上接第 4 页)

钟 丹(1988),男,江苏南京人,助理工程师,从事电网主设备在线监测数据巡视和分析工作;

胡成博(1984),男,江西赣榆人,工程师,从事开关类设备状态评价、设备状态监测系统分析管理及专业信息系统设计工作。

Status Analysis and Application Suggestions of Online Monitoring Device on Power Transmission and Transformation Equipment in Jiangsu Power Grid

TANG Mengying, LU Yongling, XU Wei, ZHONG Dan, HU Chengbo

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: This paper pays attention to three mature types of online monitoring devices, namely transformer oil chromatography, dc magnetic bias and insulator pollution degree, which have high data availability. The principles of monitoring devices are illustrated in the paper. By practical application cases, the status of online monitoring devices utilized in Jiangsu power grid transmission and distribution system are analyzed. The result of analysis shows it is necessary to improve the reliability of online monitoring device and to strengthen the relationship between online monitoring data and fault defects detection which will promotes the intelligent development of online monitoring devices.

Key words: online monitoring; oil chromatographic; dc magnetic bias; insulator pollution degree