

需求响应参与电力系统调频的延时建模与控制

叶子健, 陈培培, 包宇庆

(南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210023)

摘要:传统的电力系统调频通过控制发电机的功率输出来跟踪变化的负荷。近年来,许多研究表明利用需求响应能够更好地控制辅助系统调频。然而需求响应控制过程中存在的响应延时和通信延时会对控制结果产生不良影响。本文分别对需求响应参与调频控制过程中的响应延时和通信延时进行建模,并研究其对控制结果的影响,及两种延时在最优控制问题中对最优控制参数的影响。仿真结果表明,正确地需求响应参与调频过程中的延时进行建模,并设计最优控制策略,能够显著地改善控制效果。

关键词:需求响应;频率控制;响应延时;通信延时

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)02-0008-05

0 引言

电力系统的频率反映了电力供需的平衡情况。当出现供需不平衡时,系统频率就会升高或者降低,此时需要发电机组减少或者增加有功出力使得频率恢复到额定值。随着可再生能源的发展,风电、光伏等可再生能源的波动性、间歇性给电力系统的运行带来了新的挑战,传统的频率控制方法已经不能够很好地满足当前的控制需求^[1]。加之经济发展使得用户用电设备种类增多,用电需求量增大,负荷特性也趋于多样化,通过需求响应来辅助电力系统调频已成为当前电力系统调频技术发展的重要方向之一。

需求响应指用户对价格或者激励信号做出响应,并改变用电方式,从而满足电网优化运行或控制的需要^[2-3]。通过促进与客户的交互,需求响应可以为市场效率提供广泛的潜在收益,降低总体的成本投资^[4]。随着智能电网的快速发展,欧美等发达国家开展了一系列自动需求响应的研究。自动需求响应方法不依赖任何人工操作,仅通过接受外部信号触发用户侧需求响应程序以达到控制目的,大大提高了需求响应的可靠性、再现性、鲁棒性和成本效益^[5-6]。参与需求响应的负荷一般是对连续供电要求不高的电器设备,比如电冰箱、空调等,短暂地关闭这些设备不会影响其正常运行^[7]。

近年来,采用需求响应进行频率控制受到越来越多的关注^[8]。文献[9—11]针对一次调频分别提出了分散的需求响应控制策略和集中的需求响应

控制策略;文献[12]将需求响应资源与旋转备用相结合以应对突发状况下的电力系统调频问题;文献[13]讨论了智能建筑与微网的自动需求响应技术;文献[14]对需求响应参与西班牙短期电力市场进行了仿真;文献[15]则对需求响应参与大规模风电加入下的电力系统频率调节进行了讨论。虽然大量研究表明通过需求响应能够很好地实现系统频率的稳定控制,但这些研究中常常忽略了控制延时对需求响应调频效果的影响。

需求响应参与电网调频存在两方面的控制延时:一方面是频率检测过程中的延时,另一方面是控制过程中的通信延时,从而使调频失去本应有的快速性和可靠性^[16],所以有必要对需求响应参与调频过程中的延时进行分析和讨论。

基于上述问题,本文对需求响应在调频过程中的延时进行建模,并计及延时对控制系统进行优化,最后通过对比仿真结果分析系统延时对电网调频造成的影响。

1 模型建立

1.1 延时的建模

在实际的需求响应控制系统中,一般存在两种延时,即通信延时和响应延时。

通信延时是由通信传输造成的,其主要影响因素有设备的位置、信号传播速度等,在现有的通信技术条件下,最高可能出现长达500 ms的延时^[17]。通信延时可用一个纯延时环节来表示,用传递函数表示为:

$$H(s) = e^{-T_c s} \quad (1)$$

式中: T_c 为延时时长; s 为拉普拉斯算子。根据文献[11]进行的仿真,当延时达到500 ms时,调频控制

收稿日期:2017-11-02;修回日期:2017-12-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51707099);中国博士后科学基金(2017M611859)

策略将无法保证系统稳定。在本文中假设通信延时时长为0~0.5 s。

而响应延时的产生是由于控制系统内部存在惯性环节,频率检测环节产生的延时亦可用响应延时来表示。该延时用传递函数可表示为:

$$H(s) = \frac{1}{T_R s + 1} \quad (2)$$

式中: T_R 为时间常量。根据文献[18]中的仿真实验,跟踪信号从0%阶跃值回调到95%阶跃值的响应时间约为0.18 s,因此文中令 $T_R=0.18$ 。

为了分别表示以上两种延时,假设输入信号为0到1的阶跃信号,并分别考虑通信延时和响应延时,得到如图1的仿真结果,幅值单位为1。

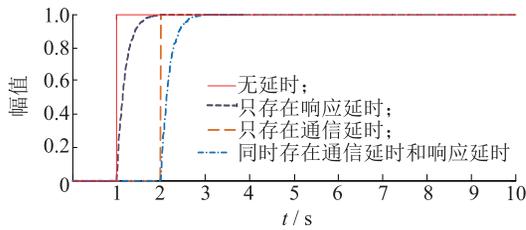


图1 信号延时示例

Fig.1 An example of signal delay

1.2 电力系统频率响应模型

由于目前我国仍以火力发电为主,为方便建立模型和提高模型的适用性,文中考虑了一个由火电机组组成,基准功率为50 MW的单区域系统,假设系统中同时存在通信延时和响应延时,同时考虑到控制器和汽轮机的惯性环节,最终建立如图2所示的频率响应模型,其中各参数如表1所示。

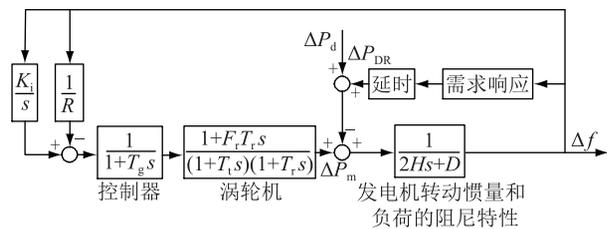


图2 假设的电网系统中的频率响应模型

Fig.2 The frequency response model in the assumed grid system

火电机组的参数定义如表2所示。在仿真平台MATLAB中根据图2建立模型,并将上述参数代入,最终得到如图3所示的控制系统。

1.3 需求响应控制策略

本文采用集中式需求响应控制策略,通过控制中心控制分散的需求侧资源以实现调频,在控制过程中,控制中心负责整个系统控制逻辑的计算和发送。

表1 频率响应模型中的参数

Tab.1 The parameters in the frequency response model

符号	含义	单位
ΔP_m	火电机组输出功率偏差	p.u.
ΔP_d	扰动功率:为正表示有功功率缺额,为负表示有功功率过剩	p.u.
T_i	汽轮机时间常数	s
Δf	系统频率偏差	p.u.
K_i	二次调频的积分增益	
F_r	再热系数	s
R	一次调频调差系数	
T_g	调速器时间常数	s
ΔP_{DR}	需求响应所产生的功率改变量	p.u.
T_r	汽轮机组的再热时间常数	s
D	负荷阻尼系数	
H	发电机组的惯性常量	

表2 在频率响应模型中的各参数数值

Tab.2 The values of each parameter in the frequency response model

参数	数值	参数	数值
R	0.05	F_r/s	0.3
T_g/s	0.2	H	5
T_r/s	7	D	1
T_i/s	0.3		

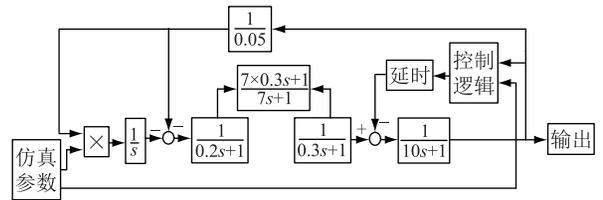


图3 仿真模型

Fig.3 The simulation model

在需求响应调频控制策略中,电网频率 f 反映了电力供给和需求之间的平衡关系, ΔP_{DR} 反映了通过需求响应控制电力需求改变量的大小。在确定需求响应控制策略时,以这2个参数为基础,分成多个阶段对频率进行控制。图4为文中采用的控制逻辑,整个控制逻辑分3个阶段描述,如图5所示。

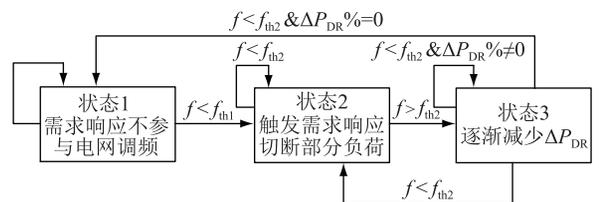


图4 需求响应控制策略

Fig.4 Control strategy of demand response

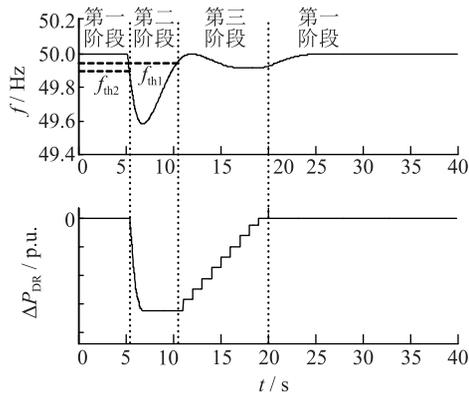


图5 需求响应控制策略的3个阶段

Fig.5 Three stages of control strategy of demand response

状态1:在此阶段,电网频率处在预先设定的正常范围内,需求响应不参加电网调频。当 f 低于某一预设值时(本文假设为 $f < f_{th1}$, f_{th1} 为控制逻辑由状态1进入状态2的边界频率),就进入状态2。

状态2:此阶段认为电网频率处于不正常范围,需求响应介入电网调频。此时,将通过削减负荷调节系统频率。削减负荷的比例可以用式(3)表示:

$$\Delta P_{DR} \% = K_{DR} \Delta f \quad (3)$$

式中: K_{DR} 是一个预先设定的参数。一旦进入阶段2,所有被削减的负荷将不会再被打开直到阶段3。当 f 逐渐恢复直到高于另一预设值(本文假设为 $f > f_{th2}$, f_{th2} 为控制逻辑由状态2进入状态3的边界频率),进入状态3。

状态3:此阶段认为电网频率已经恢复到正常范围,于是逐渐打开在阶段2被削减的负荷,即 ΔP_{DR} 将以 K_{re} 逐渐减小直至为0(其中 K_{re} 为负荷恢复的速度)。当 $\Delta P_{DR} = 0$ (此时我们假设电网频率仍是 $f > f_{th2}$),回到状态1。

上述控制策略中,可以通过启发式算法优化计算关键参数 $K_i, f_{th1}, f_{th2}, K_{DR}, K_{re}$ 。假设电网中出现一个突然的扰动导致电网频率降低,需求响应将介入电网调频,此时频率控制不仅需要电网频率尽可能快地回调到正常范围,还需尽可能减小频率跌落幅值。此外,仍需考虑一个罚函数,以防止超调和波动的产生。

最终的多目标优化的目标函数表达式如下:

$$\min W_1 \int_0^{\infty} |\Delta f| dt - W_2 f_{\min} + W_3 \int_0^{\infty} G(\Delta f) dt \quad (4)$$

式中: W_1, W_2, W_3 为权重参数; f_{\min} 为调频过程中电网出现的最低频率。

2 算例分析

本文参考文献[18],以遗传算法为基础,利用

MATLAB对函数(4)中的5个参数: $K_i, f_{th1}, f_{th2}, K_{DR}, K_{re}$ 进行仿真优化,最终找到最优参数,另外3个权重参数分别预设为1,10,100 000。表3给出了各个待优化参数的上下限。

表3 待优化参数上下限

Tab.3 The upper and lower limits of the parameters to be optimized

参数	上限	下限	参数	上限	下限
K_i	0.3	0.1	K_{DR}	10	1
f_{th1}	49.9	49.8	$K_{re}/\%$	30	5
f_{th2}	49.95	49.9			

逐步更改 Simulink 仿真回路的参数,分别对不考虑延时和考虑到延时两种情况进行仿真优化,同时在考虑到延时的情况下,将响应延时设置为0.18 s,而将通信延时分别设为0.1 s,0.2 s,0.3 s,0.4 s和0.5 s,最终得到表4中的5组优化结果,表5为不考虑延时的参数优化结果。

表4 考虑到不同延时的参数优化结果

Tab.4 The parameter optimization results when different length of delay are considered

参数	0.1 s	0.2 s	0.3 s	0.4 s	0.5 s
K_i	0.114 3	0.106 4	0.105 0	0.106 8	0.102 0
f_{th1}	49.855	49.889	49.869	49.893	49.899
f_{th2}	49.922	49.930	49.910	49.902	49.901
K_{DR}	1.751 5	1.730 3	1.489 3	1.298 4	1.206 1
$K_{re}/\%$	24.72	23.53	16.55	22.38	24.22

表5 不考虑延时的参数优化结果

Tab.5 The parameter optimization results when delay is not considered

参数	无延时	参数	无延时
K_i	0.115 6	K_{DR}	8.459 4
f_{th1}	49.900	$K_{re}/\%$	6.02
f_{th2}	49.931		

由表4可看出,由于考虑了延时,5个待优化参数 $K_i, f_{th1}, f_{th2}, K_{DR}, K_{re}$ 都发生了变化,其中负荷削减和恢复参数 K_{DR}, K_{re} 的变化最为明显。由此可见,延时时对控制系统优化结果会产生明显的影响,如果在优化过程中不考虑延时,可能会由于参数选择不合适而影响系统调频的性能。

为验证延时时对系统频率存在影响,在接下来的算例中,分别考虑两种情形:一种为无延时的情形,系统参数设置为表5所示,另一种为存在0.18 s响应延时和0.5 s通信延时的情形,系统参数设置为表4中最后一列所示。仿真结果如图6所示。

从图6中可以看出,如果系统中存在延时却不

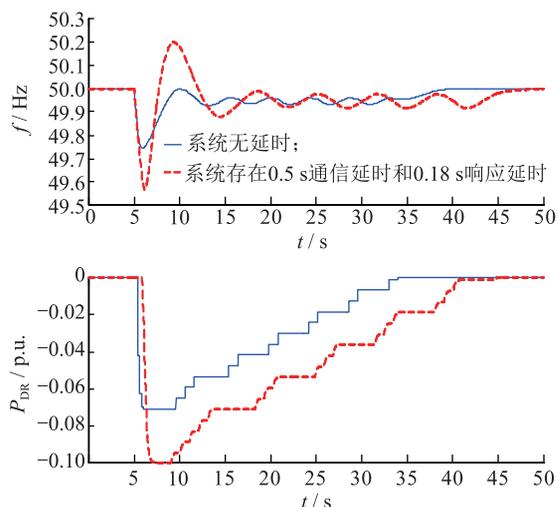


图6 两种情形下的仿真结果

Fig.6 Simulation results in two scenarios

加以考虑,将会使得频率超出正常范围($f < f_{th1}$)后,需求响应不能及时参与电网调频,从而导致频率跌落幅值过大;同样地,当频率恢复到正常范围时($f > f_{th2}$),控制器也会因为延时的存在而不能准确快速地恢复先前被削减的负荷,导致频率出现波动,调节时间也因此增加,且会出现明显的超调现象,进一步说明了在需求响应参与调频控制中考虑延时的重要性。

3 结语

文中针对需求响应参与调频控制过程中的延时情况,分析了其延时组成,并分别对响应延时和通信延时进行了建模。通过算例分析了延时对需求响应调频效果的影响,表明延时会影响参数优化结果。如果在控制参数确定过程中不考虑延时,会直接影响调频控制的效果;而如果在参数优化过程中正确地对延时进行建模,将显著改善控制效果。

文中研究了单区域系统中需求响应时延对一次调频的影响。未来的工作中将研究二次调频的延时问题以及多区域电网中需求响应时延的影响。

参考文献:

- [1] 汪海瑛. 含大规模可再生能源的电力系统可靠性问题研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
WANG Haiying. Research on reliability evaluation of power system incorporating large-scale renewable energy resource [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.
- [2] 张刘冬, 丁昊, 袁晓东, 等. 考虑价格需求响应的主动配电网动态经济调度[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 31-35.
ZHANG Liudong, DING Hao, YUAN Xiaodong, et al. Active and reactive power coordinated economic dispatch of active distribution networks with consideration of price-based demand response[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36

- (4): 31-35.
- [3] US Department of Energy. Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them; a report to the United States Congress pursuant to section 1252 of the Energy Policy Act of 2005 [EB/OL]. [2015-05-23]. <http://eetd.lbl.gov/ea/EMS/reports/congress-1252d.pdf>.
- [4] SIANO P. Demand response and smart grids—A survey[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 30(2): 461-478.
- [5] 高赐威, 梁甜甜, 李扬. 自动需求响应的理论与实践综述[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 352-359.
GAO Ciwei, LIANG Tiantian, LI Yang. A survey on theory and practice of automated demand response [J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 352-359.
- [6] 张晶, 孙万珺, 王婷. 自动需求响应系统的需求及架构研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4070-4076.
ZHANG Jing, SUN Wanjun, WANG Ting. Studies on requirements and architecture for automated demand response system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4070-4076.
- [7] ZHAO X, OSTERGAARD J, TOGBEY M. Demand as frequency controlled reserve [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1062-1071.
- [8] 包宇庆. 需求响应参与电力系统调频机理及控制研究[D]. 南京:东南大学, 2015.
BAO Yuqing. The mechanism and control of demand response in the frequency control of the power systems [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [9] LU S, SAMAN N, DIAO R, et al. Centralized and decentralized control for demand response [J]. Innovative Smart Grid Technologies, 2011: 1-8.
- [10] MOLINA G A, BOUFFARD F, KIRSCHEN D S. Decentralized demand-side contribution to primary frequency control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 411-419.
- [11] POURMOUSAVI S A, NEHRIR M H. Real-time central demand response for primary frequency regulation in microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1988-1996.
- [12] CHANG C L, AN L, LIN T, et al. Incorporating demand response with spinning reserve to realize an adaptive frequency restoration plan for system contingencies [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1145-1153.
- [13] SAMAD T, KOCH E, STLUKA P. Automated demand response for smart buildings and microgrids: the state of the practice and research challenges [J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(4): 726-744.
- [14] VALENCIA S I, ÁLVAREZ C, ESCRIV E G, et al. Simulation of demand side participation in Spanish short term electricity markets [J]. Energy Conversion & Management, 2011, 52(7): 2705-2711.
- [15] 包宇庆, 李扬, 王春宁, 等. 需求响应参与大规模风电接入下的电力系统频率调节研究[J]. 电力系统保护与控制,

- 2015, 43(4): 32-37.
- BAO Yuqing, LI Yang, WANG Chunning, et al. On demand response participating in the frequency control of the grid under high wind penetration [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 32-37.
- [16] 姚 伟, 文劲宇, 孙海顺, 等. 考虑通信延迟的分散网络化预测负荷频率控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 84-92.
- YAO Wei, WEN Jingyu, SUN Haishun, et al. Decentralized networked predictive load frequency control considering communication delays [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 84-92.
- [17] BAO Yuqing, LI Yang. FPGA-based design of grid friendly appliance controller[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 924-931.
- [18] BAO Yuqing, LI Yang. Optimal design of demand response in load frequency control[J]. Power & Energy Engineering Conference, 2015 :1-4.

作者简介:



叶子健

叶子健(1997—),男,本科,研究方向为需求响应参与电力系统调频的建模与控制(E-mail:15152616598@163.com);

陈培培(1993—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统需求响应、电力系统调频(E-mail:peipei_chan@qq.com);

包宇庆(1987—),男,博士,讲师,研究方向为电力系统调频,电力系统建模与控制。

Modeling and Control Strategy for the Delay of Demand Response in the Frequency Control of Power System

YE Zijian, CHEN Peipei, BAO Yuqing

(Nari School of Electrical Engineering and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Conventional frequency control of the power system is realized by tracking varying loads through controlling the power output of generators. In recent years, many studies have shown that the demand response can better support the frequency control of power systems. However, the response delay and communication delay in the process of demand response can adversely affect the control results. This paper models the response delay and communication delay in the controlling process respectively, analyzes its influence on control results, and studies the influence of two kinds of delay on optimal control parameters in optimal control problem. The simulation analysis shows that the optimal control strategy can improve the control effect significantly.

Key words: demand response; frequency control; response delay; communication delay

(编辑 方 晶)