

# 基于频率变化速率的需求响应控制方法

叶子健,包宇庆,刘其良,李笑彦,张卉琳,周 劲

(南京师范大学南瑞电气与自动化工程学院,江苏 南京 210042)

[摘要] 从理论计算出发,提出了一种基于频率变化速率的需求响应参与电力系统一次调频的实现方法. 通过实时检测电力系统的频率及其变化率,计算负荷扰动的幅值和临界值,进而计算出所需动作的需求响应负荷的大小,然后暂时关闭该部分负荷,以辅助电力系统调频. 仿真实验验证了方法能准确计算出需要动作的需求响应负荷的大小,有利于保护系统频率的稳定.

[关键词] 电力系统调频,需求响应,电网友好型设备

[中图分类号] TM73 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2018)03-0063-06

## A Control Method of Demand Response Based on Frequency Variation Rate

Ye Zijian, Bao Yuqing, Liu Qiliang, Li Xiaoyan, Zhang Huilin, Zhou Jin

(School of NARI Electrical and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** Focusing more on the theoretical calculation, this paper proposes a method to realize demand response in primary frequency control. In this method, the frequency and the frequency variation rate are used to calculate the disturbance's amplitude and critical value, by which the load of required demand response can be obtained. This part of load is then temporarily closed to assist power system frequency regulation. Simulation experiments verify that the proposed method can accurately calculate the demand response load, which is more conducive to the stability of system frequency.

**Key words:** load frequency control, demand response, grid-friendly device

电力系统的频率变化能够反映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. 传统电力系统主要从电源侧入手,执行“电源调度”,通过改变发电机的有功出力来实现频率调节,主要包括一次调频和二次调频. 一次调频是电力系统调频中最基本的环节,承担了电力系统中大部分的负荷扰动. 一次调频能够对电网频率波动立即做出响应,调节过程可以在 10 s 内完成. 二次调频通过调节发电机输出功率的给定值,能够消除一次调频的稳态误差. 二次调频的调节时间可达数分钟<sup>[1-3]</sup>.

与传统电力系统执行的“电源调度”不同,需求响应提供了一种电力系统调频的新手段,通过使需求侧可调度的资源作为供应侧的替代资源,让这部分负荷能够对电力系统频率波动做出响应,从根本上解决了应急状态下电力供需实时平衡问题、稳定电网频率波动.

参与需求响应的电器设备称为电网友好型设备<sup>[4-7]</sup>,空调、热水器等对连续性供电要求不高的电器设备均属于电网友好型设备. 当电力系统发生有功功率缺额而导致频率降低时,电网友好型设备将按照一定的控制策略自动切断电源,帮助电网恢复频率<sup>[8]</sup>. 为使电网友好型设备参与调频,设备需安装功率调节控制器. 而随着智能电表及智能量测技术的发展,这一类控制器已被研发出来,采用集中或分散式控制方式,通过专用光纤通道实现设备与控制中心的信息交互<sup>[9]</sup>. 目前所设计绝大多数参与电力系统调频的需求响应设备通过设定一定的频率阈值来实现,即当电力系统频率下降到该阈值以下时,设备自动切断电源,帮助电网恢复频率. 当电网频率恢复到额定频率以上时,设备自动接通电源,逐渐恢复到正常工况<sup>[10-11]</sup>. 频率阈值的取值,往往通过经验给出. 例如,为了使电力系统控制频率在 49.5 Hz 以上,设置需求

响应动作的频率阈值为 49.8 Hz.

本文通过对电力系统频率响应模型进行分析,通过系统频率变化率求得负荷扰动的幅值和临界值,给出了需求响应参与电力系统一次调频的完整计算过程和实现方案. 相比于设定频率阈值的方法,通过计算得到的需求响应负荷能够更加准确地对扰动做出响应,可以取得更好的调频效果.

## 1 电力系统频率响应模型

电力系统的频率响应是一个复杂的非线性过程,当系统频率在小范围内波动时,可以将电力系统的频率响应函数用近似线性化模型来表示<sup>[12]</sup>. 图 1 所示的是计及了再热式汽轮机的电力系统频率响应模型. 其中,各参数如表 1 所示.

实际中,再热式汽轮机的再热时间常数  $T_r$  为 6~12 s,而  $T_g$  和  $T_l$  仅为 0.3~0.5 s,满足  $T_r \gg T_g$  和  $T_r \gg T_l$ ,由于  $T_r$  主导电力系统的频率响应特性,因此可以将  $T_g$  和  $T_l$  忽略不计<sup>[13]</sup>. 系统的频率响应传递函数可以化简为图 2 所示的形式.

本文重点考虑需求响应对一次调频的影响(二次调频的响应时间远大于一次调频<sup>[1-3]</sup>),模型中忽略二次调频,因此可以令  $u=0$ ,频率偏差  $\Delta f$  关于负荷扰动  $\Delta P_l$  的传递函数可以化为图 3 所示的形式,即:

$$\frac{\Delta f(s)}{\Delta P_l(s)} = -\frac{\frac{1}{Ms+D}}{1 + \frac{1}{Ms+D} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{1+F_r T_r s}{1+T_r s}} = -\frac{R(1+T_r s)}{MRT_r s^2 + (MR+DRT_r+F_r T_r) \cdot s + DR+1}. \quad (1)$$

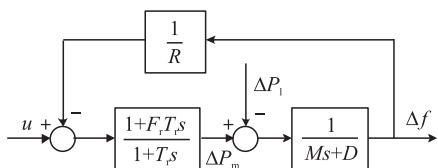


图 2 化简后的电力系统频率响应模型

Fig. 2 The simplified frequency response model

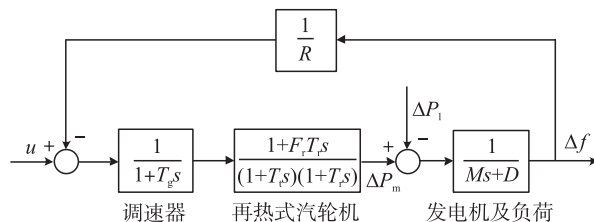


图 1 电力系统频率响应模型

Fig. 1 Frequency response model of power system

表 1 电力系统频率响应模型参数

Table 1 Parameters of SFR model

符号	含义	单位
$T_g$	调速器时间常数	s
$F_r$	再热系数	s
$T_r$	再热时间常数	s
$T_l$	汽轮机时间常数	s
$u$	二次调频控制输出	MW
$\Delta f$	频率偏差	Hz
$\Delta P_l$	负荷扰动	p.u.
$\Delta P_m$	汽轮机输出有功功率变化量	p.u.
$R$	调速器速度调节	—
$M$	发电机转子的等效惯性常数	—
$D$	负荷阻尼系数	—
$s$	拉普拉斯算子	—

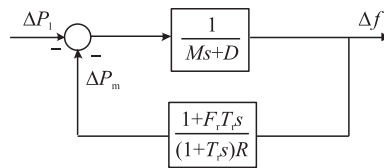


图 3 频率偏差关于负荷扰动的传递函数

Fig. 3 The transfer function about the disturbance of frequency deviation

负荷的瞬时性扰动通常可以看作是一个阶跃函数,因此我们可以假设扰动  $\Delta P_l$  为

$$\Delta P_l = P_{\text{step}} \cdot u(t). \quad (2)$$

式中,  $P_{\text{step}}$  为扰动幅值,  $u(t)$  为单位阶跃函数. 拉氏变换后得到

$$\Delta P_l(s) = \frac{P_{\text{step}}}{s}.$$

将其代入式(1)可以得到频率偏差  $\Delta f$  的表达式

$$\Delta f(s) = -\frac{R(1+T_r s) \cdot P_{\text{step}}}{(MRT_r s^2 + (MR+DRT_r+F_r T_r) \cdot s + DR+1) \cdot s}. \quad (3)$$

对进行拉式逆变换得到电力系统的频率响应函数

$$\Delta f(t) = -\frac{RP_{\text{step}}}{DR+1} (1 + ae^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_r t + \phi_1 - \phi_2)). \quad (4)$$

$$\text{式中, } \omega_n = \sqrt{\frac{DR+1}{MRT_r}}, \zeta = \frac{MR+DRT_r+F_rT_r}{2(DR+1)} \cdot \omega_n, \omega_r = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}, a = \sqrt{\frac{1-2T_r\zeta\omega_n+T_r^2\omega_n^2}{1-\zeta^2}}, \phi_1 = \arctan\left(\frac{\omega_r T_r}{1-\zeta\omega_n T_r}\right),$$

$$\phi_2 = \arctan\left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{-\zeta}\right).$$

设系统参数:  $F_r=0.3, T_r=7, M=10, D=2.4, R=0.05$ , 系统容量为 50 MW,  $\Delta P_1$  和  $\Delta P_m$  的基准值为 1 MW. 当系统突发 7.5 MW 的有功功率缺额时 ( $P_{\text{step}}=7.5$  MW), 电力系统的频率响应曲线如图 4 所示.

从图 4 可以看出, 当系统出现有功功率缺额时, 电网频率将会降低. 通过一次调频可以增加发电机的有功出力, 从而恢复电力系统的频率. 在本文所假设的电力系统中, 最大频率跌落约为 0.93 Hz. 我国电力系统频率偏差的相关标准, 电力系统正常频率偏差允许值为  $\pm 0.2$  Hz. 如是容量较小的系统, 频率偏差不得大于  $\pm 0.5$  Hz, 当频率跌落大于 0.5 Hz 时将可能触发自动低频减负荷装置, 造成局部停电.

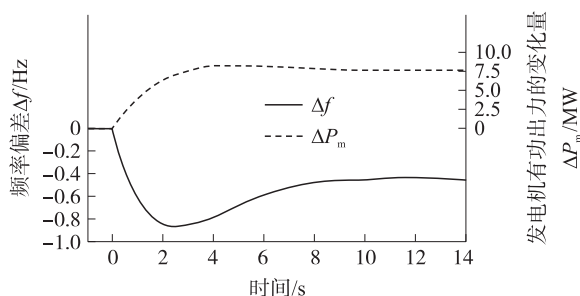


图 4 电力系统一次调频频率响应曲线  
Fig. 4 Frequency response of power system primary frequency regulation

## 2 基于频率阈值的需求响应控制方法

需求响应利用一部分特定负荷进行调频, 这部分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. 在不影响设备运行特性的条件下, 参与需求响应的负荷可看作一组备用容量, 可以根据有功功率的平衡情况做出调整, 调节有功功率的平衡, 进而实现对电力系统频率的调节.

当系统频率过低时, 电网友好型设备通过自动切断电源参与电力系统调频, 而短暂的断电对这类设备的正常运行基本上不会造成影响. 以电热水器为例, 通常电热水器的负荷占到居民总负荷的 11%<sup>[14]</sup>, 如果把所有电热水器都改造成电网友好型设备, 与一次调频相配合, 能够改善电力系统的稳定性.

图 5 建立了需求响应参与下的电力系统频率响应模型, 其中  $P_{DR}$  为需求响应负荷. 需求响应能够直接改变扰动负荷  $\Delta P_1$ , 使负荷扰动量由  $\Delta P_1$  变为  $\Delta P'_1 = \Delta P_1 - P_{DR}$ , 降低了负荷扰动对电网运行的影响. 相比于一次调频, 需求响应省略了汽轮机调速过程中的惯性环节的延时 ( $T_r$  为 6~12 s), 比一次调频更加迅速.

文献[4]设计了一种“比较+延时”的电网友好型设备控制逻辑: 当控制系统检测电力系统频率偏差  $\Delta f$  跌落至低于阈值  $\Delta f_0$  时, 需求响应负荷动作经过 16 s 延时后重新打开动作负荷. 由于电网友好型设备重新打开所需的 16 s 延时大于一次调频所需的时间, 本文中不讨论设备延时打开的过程.

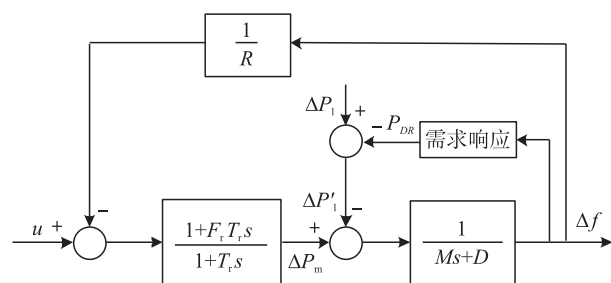


图 5 采用需求响应的频率响应模型  
Fig. 5 Frequency response model with demand response

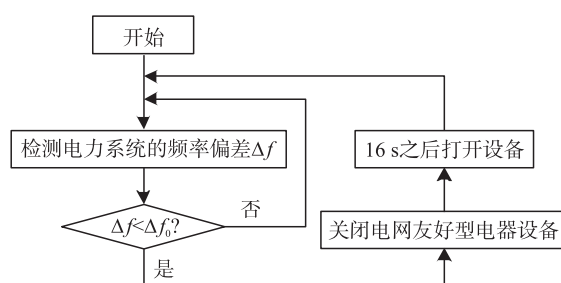


图 6 频率阈值法流程图  
Fig. 6 Flowchart of frequency threshold method

上述需求响应控制逻辑的实现过程非常简单, 即当系统发生频率跌落时, 所有需求响应负荷动作. 但该控制方法的实际控制效果并不理想, 甚至会导致系统超调. 设需求响应动作的频率阈值  $\Delta f_0$  为 -0.1 Hz, 当系统突然发生 7.5 MW 的有功功率缺额时 ( $P_{\text{step}}=7.5$  MW), 系统的频率响应曲线如图 7 所示. 从图 7 可以看出, 当电力系统的频率偏差下降到 -0.1 Hz 时, 需求响应负荷动作帮助电力系统恢复频率. 然而可用

的需求响应总负荷不同时,电力系统的调频效果差别很大. 当可用的需求响应总负荷为 6 MW 时,采取需求响应后电力系统的频率响应曲线有明显的改善,最大频率跌落不到 0.2 Hz. 而当可用的需求响应负荷总量为 12 MW 时,调频过程出现了超调,且超调量超过 0.7 Hz,并且频率偏差稳定在正值. 且电力系统的二次调频依赖检测频率偏差  $\Delta f$  来实现,频率偏差为正值将使二次调频继续减少发电机的有功出力,使频率问题更加恶化.

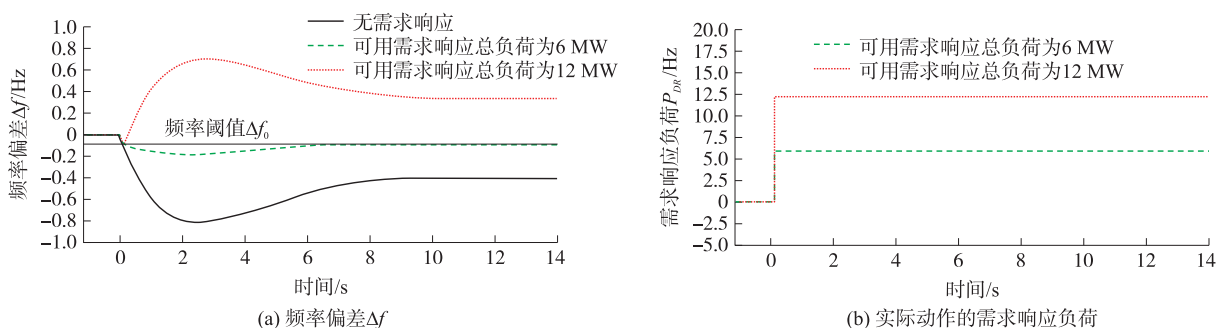


图 7 频率阈值法下的频率响应曲线

Fig. 7 Frequency response with frequency threshold method

### 3 基本频率变化速率的需求响应的计算方法及其控制策略

当系统出现有功功率缺额时,仅需部分可用需求响应负荷动作即可将系统频率跌落控制在预先设定的范围内. 需求响应负荷的多少需要扰动幅值  $P_{step}$  及其临界值  $P_{max}$  进行计算.

$$\Delta f'(s) = \frac{R(1+T_r s) \cdot P_{step}}{MRT_r s^2 + (MR + DRT_r + F_r T_r) \cdot s + DR + 1}. \quad (5)$$

根据拉氏变换初值定理,有:

$$\Delta f'(0+) = -\lim_{s \rightarrow \infty} s \cdot \frac{R(1+T_r s) \cdot P_{step}}{MRT_r s^2 + (MR + DRT_r + F_r T_r) \cdot s + DR + 1} = -\frac{P_{step}}{M}.$$

即

$$P_{step} = -M \cdot \Delta f'(0+). \quad (6)$$

通过电力系统频率在扰动发生瞬间时的变化率  $\Delta f'(t_0)$  可以计算求得扰动幅值  $P_{step}$ . 得到扰动幅值后还需对扰动的允许值进行计算,因此需要计算电力系统最大频率跌落  $\Delta f_m$  和扰动幅值  $P_{step}$  之间的关系. 文献 [13] 给出了最大频率跌落  $\Delta f_m$  的计算公式. 首先需要计算电力系统频率偏差的导数  $\Delta f'(t)$

$$\frac{d\Delta f}{dt} = \frac{a\omega_n R P_{step}}{DR + 1} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_r t + \phi_1). \quad (7)$$

假设最大频率跌落对应的时刻为  $t_z$ , 在  $t_z$  时刻,频率偏差的导数  $d\Delta f(t_z)/dt = 0$ , 即

$$\frac{a\omega_n R P_{step}}{DR + 1} e^{-\zeta\omega_n t_z} \sin(\omega_r t_z + \phi_1) = 0. \quad (8)$$

解得

$$t_z = \frac{n\pi - \phi_1}{\omega_r} = \frac{1}{\omega_r} \arctan\left(\frac{\omega_r T_r}{\zeta\omega_n T_r - 1}\right). \quad (9)$$

将上式代入式(7), 即可得到最大频率跌落的表达式

$$\Delta f(t_z) = -\frac{R P_{step}}{DR + 1} (1 - a e^{-\zeta\omega_n t_z} \sin \phi_2). \quad (10)$$

上述所有计算都是基于扰动前频率偏差为 0 的假设, 如果发生扰动的时刻频率偏差  $\Delta f$  不为零, 还需对上式进行修正,

$$\Delta f(t_z) = \Delta f(0) - \frac{R P_{step}}{DR + 1} (1 - a e^{-\zeta\omega_n t_z} \sin \phi_2). \quad (11)$$



其中,  $\Delta f(0)$  为发生扰动瞬间的频率偏差. 假设需要将电力系统频率偏差维持在高于  $\Delta f_m$  的范围内, 有功功率缺额的临界值  $P_{\max}$  可以通过公式的变形进行计算,

$$P_{\max} = \frac{(DR+1)(f(0)-\Delta f_m)}{1-ae^{-\zeta\omega_n t_z} \sin \phi_2}. \quad (12)$$

只要扰动幅值  $P_{\text{step}}$  小于  $P_{\max}$ , 可认为电力系统频率偏差不会超过  $\Delta f_m$  的范围, 需求响应不参与电网调频. 但如果  $P_{\text{step}}$  大于  $P_{\max}$ , 电力系统的频率将超出  $\Delta f_m$  的范围, 需求响应触发, 系统将自动切除部分负荷. 所需动作的需求响应总负荷为

$$P_{DR} = P_{\text{step}} - P_{\max}. \quad (13)$$

下面是参与电力系统一次调频需求响应的完整计算过程:

step 1: 实时检测电力系统的频率偏差  $\Delta f$  及其变化率  $\Delta f'$ .

step 2: 通过式计算扰动的幅值  $P_{\text{step}}$ .

step 3: 通过式计算扰动的临界值  $P_{\max}$ .

step 4: 如果  $P_{\text{step}} > P_{\max}$ , 启用需求响应, 所需动作的需求响应的总负荷  $P_{DR} = P_{\text{step}} - P_{\max}$ . 如果  $P_{\text{step}} < P_{\max}$ , 则不需要采取需求相应措施, 回到 step 1.

以第2节的模型为例, 假设电力系统可用需求响应总负荷为 12 MW, 当系统在 0 时刻突然发生 7.5 MW 的有功功率缺额时 ( $P_{\text{step}} = 7.5$  MW), 按照本文要求, 频率跌落应当控制在大于  $\Delta f_m = -0.5$  Hz 的范围内. 采用 step 1~step 4 的计算步骤: 在 0 时刻测得频率偏差  $\Delta f$  及其变化率  $\Delta f'$  分别为 0 Hz 和  $-0.7472$  Hz/s (采样频率为 100 Hz), 通过式 (6) 和式 (12) 算得的  $P_{\text{step}}$  和  $P_{\max}$  分别为 7.472 MW 和 5.095 MW, 因此实际需要动作的需求响应负荷  $P_{DR}$  为 2.377 MW.

假设扰动发生瞬间有 2.377 MW 的需求响应负荷动作, 系统频率响应曲线如图 9 所示. 从图 9 可以看出, 采用本文方法进行需求响应控制后, 电力系统的频率偏差  $\Delta f$  能够控制在大于  $-0.5$  Hz 的范围内, 并且整个调节过程中没有超调, 符合一次调频的要求. 因此, 当电力系统发生频率缺额时, 尽管电力系统中可用的需求响应负荷 12 MW, 但并不需要所有可用的需求响应负荷都动作, 而只需要 2.377 MW 即可将频率偏差控制在期望的范围内, 采用本文的方法可以对可用的需求响应负荷进行有效地利用.

然而对于每一台电网友好型设备, 只能控制“打开”和“关断”两种状态. 可以通过两种方法实现对响应负荷  $P_{DR}$  的控制:

#### (1) 集中控制

参与需求响应的各台电网友好型设备与电网中的集中控制中心相连. 测量和计算的工作都由集中控制中心完成, 集中控制中心通过通信线路控制所有设备的“打开”和“关断”状态, 从而实现对需求响应负荷  $P_{DR}$  的控制. 这种方法和电力系统低频减载非常相似, 但是由于电网中有千万个用电设备需要控制, 这种方法对通信的要求较高.

#### (2) 分散控制

所有参与需求响应的电网友好型设备之间相互独立, 且并无通信线路相连, 测量和计算的工作都由各电网友好型设备各自完成. 在这种情况下, 可以通过设置设备优先级的方法来实现. 由于采取需求响应措施时只需部分电网友好型设备参与, 当每台电网友好型设备检测到  $P_{\text{step}} > P_{\max}$  时, 都会对  $P_{DR}$  以及自己的优

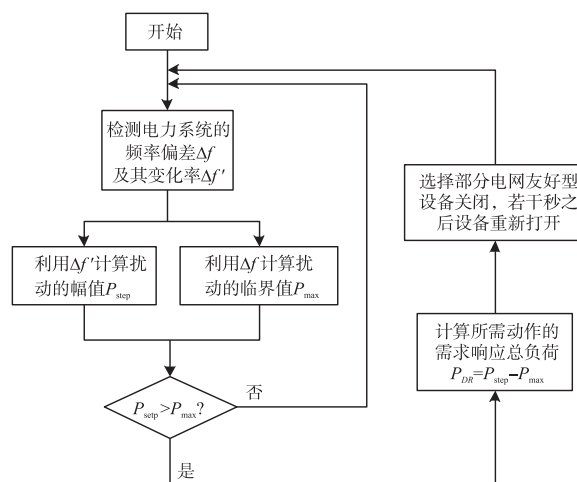


图 8 本文方法的流程图

Fig. 8 Flowchart of the proposed method

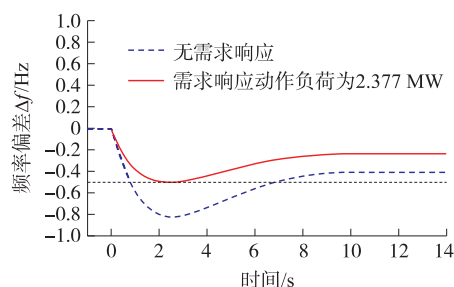


图 9 采用本文方法的频率响应曲线

Fig. 9 Frequency response with the proposed method

优先级进行分析,然后判断该设备是否动作.需求响应动作的电网友好型设备具有最高优先级.当该设备动作,其优先级会下降.反之,其优先级会上升.通过该机制,可以公平地使每台设备参与到需求响应中去.

## 4 结语

针对需求响应参与电力系统一次调频,本文提出了一种新的控制方法,以频率偏差  $\Delta f$  及其变化率  $\Delta f'$  为检测量,分别计算出临界值  $P_{\max}$  和扰动幅值  $P_{\text{step}}$ ,当  $P_{\text{step}}$  大于  $P_{\max}$  时,需求响应动作.相比于传统的频率阈值法,本文提出的方法计算量较多,但所需动作的需求响应负荷  $P_{DR}$  可控,能够更加准确地对扰动做出响应,具有更好的调频效果.仿真实验也验证了该方法的有效性.

## [参考文献] (References)

- [1] 商国才. 电力系统自动化[M]. 天津:天津大学出版社,1996.  
SHANG G C. Power system automation[M]. Tianjin:Tianjin University Press,1996.(in Chinese)
- [2] GALUS M D,KOCH S,ANDERSSON G. Provision of load frequency control by PHEVs,controllable loads,and a cogeneration unit[J]. IEEE transactions on industrial electronics,2011,58(10):4568-4582.
- [3] TAN W. Load frequency control:problems and solutions[C]//Proceedings of the 30th Chinese Control Conference. Yantai, China,2011:6281-6286.
- [4] HAMMERSTROM D,BROUS J,CARLON T A,et al. Pacific northwest gridwise testbed demonstration projects,part II:grid friendly appliance project[M]. Washington:Clothes Dryers,2007.
- [5] HAMMERSTROM D. Final letter report:grid-responsive demand-side control using grid friendly<sup>TM</sup> appliance technologies[R]. Richland:Pacific Northwest National Laboratory,2009.
- [6] LU N,HAMMERSTROM D J,PATRICK S. PNNL-18998 grid friendly<sup>TM</sup> device model development and simulation[R]. Richland:Pacific Northwest National Laboratory,2009.
- [7] WHITEN B,FULFORD G,HICKSON R,et al. The response of power systems to autonomous“grid friendly”devices[R]. New Zealand:Study Group Report of Transpower NZ,2008.
- [8] 叶子健,陈培培,包宇庆. 需求响应参与电力系统调频的延时建模与控制[J]. 电力工程技术,2018,37(2):8-12.  
YE Z J,CHEN P P,BAO Y Q. Modeling and control strategy for the delay of demand response in the frequency control of the power system[J]. Electric power engineering technology,2018,37(2):8-12.(in Chinese)
- [9] BAO Y Q,LI Y. FPGA-based design of grid friendly appliance controller[J]. IEEE transactions on smart grid,2014,5(2):924-931.
- [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] SHORT J A,INFELD D G,FRERIS L L. Stabilization of grid frequency through dynamic demand control[J]. IEEE transactions on power systems,2007,22(3):1284-1293.
- [12] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York:McGraw-Hill,1994.
- [13] ANDERSON P M,MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE transactions on power systems,1990,5(3):720-729.
- [14] JIA R,NEHRIR M H,PIERRE D A. Voltage control of aggregate electric water heater load for distribution system peak load shaving using field data[C]//Proceedings of 39th North American Power Symposium (NAPS) Margantown. USA,2007:492-497.

[责任编辑:陈 庆]