

基于事件触发的速动一次调频方法与控制策略

孟庆伟,肖尧,陈红州

(中国石油大学(华东) 新能源学院,山东 青岛 266580)

摘要:在当前电力系统惯性相对较弱的情况下,速动一次调频技术对维持系统稳定尤为重要。以传统电厂的一次调频为基础,利用频率扰动信号在通信网中的传播速度大于其在电网中的传播速度的特性,提出速动一次调频的概念,在传统惯性作用区增加一次调频控制以提升系统的稳定性。为了实现速动一次调频,提出一种事件触发控制的全网速动一次调频方法,并给出事件触发后的单机速动一次调频控制策略。搭建2区域4机系统模型进行对比仿真研究,结果表明所提方法可以加快频率稳定性的恢复速度,减小频率的波动幅度。

关键词:调频;速动一次调频;事件触发;电力系统惯性;2区域4机系统模型

中图分类号:TM 761+.2

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202010027

0 引言

当前我国正处于能源结构转型升级的关键时期,随着风电等新能源的大规模接入电网^[1-3],电网的转动惯量减小,电力系统频率的安全稳定问题受到了广泛的关注。如何有效地弥补惯性不足对稳定性的影响是当前研究的热点,现阶段主要在新能源侧、传统能源侧和电网侧开展工作以解决该问题:新能源侧通过虚拟同步发电机技术增加新能源并网的惯性支撑^[4];传统能源侧所采用的措施侧重于提升机组的响应速度;电网侧所采用的解决方案一般为多重安稳防线。传统能源一次调频对系统稳定性至关重要,而更加快速的一次调频对系统稳定的支撑更为重要。因此研究速动一次调频策略刻不容缓。

电力系统中有功功率供需不平衡会造成系统频率的变化,系统频率的变化将会进一步引起发电机组调速器和调频器动作,对应于调速器的调整为机组的一次调频,影响机组一次调频性能的参数有调频死区、转差不等率、限幅、响应延迟等,其中最重要的参数是调频死区和转差不等率。

目前对一次调频的研究主要以模型优化、参数优化以及结合相应的控制策略为主^[5-8]。文献[9]在改变火电机组运行方式的基础上,对不同情形下火电机组的运行方式重新组合,得到提升一次调频能力的方法;文献[10]研究了调频死区与转差不等率对一次调频能力的影响;文献[11]通过对数字电液DEH(Digital Electro-Hydraulic)控制器参数的优化,既保证了系统动态稳定性,又满足了一次调频要

求;文献[12]基于多尺度分解的凝结水节流超临界机组一次调频联合控制方法,在一次调频动态响应能力等方面有不错的效果。然而,针对如何进行更加快速的一次调频的研究较少。行业标准DL/T 1870—2018《电力系统网源协调技术规范》^[13]中规定火电机组(电液式调速器)的死区设置值为 ± 0.033 Hz,一次调频响应滞后时间小于3 s。若能够在电力系统受到扰动时,降低死区和扰动传播延时时对一次调频的影响,短时间内使发电机组快速有效地发挥其频率响应能力,实施速动一次调频,则可以有效地提升系统受到扰动后的频率最低点,提高频率的稳定性,从而保证系统的安全稳定运行。

针对此问题,本文开展了频率扰动事件下速动一次调频的研究,以事件触发控制技术为基础,提出了一种基于事件触发的速动一次调频方法与相关控制策略,以期更加快速地响应系统频率变化,提升一次调频的响应速度,维持电力系统的稳定。

1 传统一次调频过程

当电力系统受到扰动后,系统频率发生变化,频率变化曲线如图1所示。图中, t' 为一次调频死区的结束时间; t'' 为二次调频的开始时间; $f_1 = 50$ Hz; $f_2 = 49.96$ Hz。频率调节的过程可分为如下3个阶段。

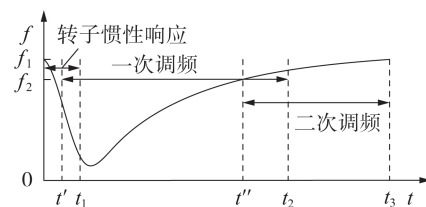


图1 系统受到扰动后电网频率的变化曲线

Fig.1 Variation curve of power grid frequency after system disturbance

(1)[0, t_1): 该阶段系统频率快速变化,此时系统自身的惯性作用导致系统频率的变化,称之为惯

收稿日期:2020-01-06;修回日期:2020-08-31

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0904800);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(18CX02113A)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2018YFB0904800) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(18CX02113A)

性响应时期。在一次调频死区 $[0, t')$ 范围内,一次调频不动作,一旦超过一次调频的死区范围,一次调频开始动作,并在 $[t', t_1)$ 范围内与发电机转子的惯性作用共同调节系统频率。

(2) $[t_1, t_2)$:一次调频响应频率变化,系统频率下降趋势得到缓解并逐渐恢复。一次调频是发电机的固有特性,属于有差调节,系统频率不能够完全恢复至 50 Hz,在 $[t', t_2)$ 范围内,发电机的二次调频加入,和一次调频共同作用恢复系统频率。

(3) $[t_2, t_3)$:该阶段只有二次调频,由调频器(厂)完成,增加发电机的出力,实现无差调节,系统有功功率重新达到平衡,频率恢复正常状态。

传统一次调频原理见附录 A 图 A1。当系统频率偏差穿越机组一次调频设置死区时,发电机组接收系统的频率偏差信号启动一次调频,利用原动机的调速系统自动调节汽门的开度,改变原动机的进汽(水)量,使原动机的输入功率变化、发电机组的转速得到了调节,进而调节频率。由频率调节过程可知,尽可能减少系统受到扰动到一次调频开始动作前这段时间所带来的延迟,就可以快速发挥电力系统的一次调频能力,更好地保证系统安全稳定地运行。

2 速动一次调频

随着新能源发电大规模并网和直流输电的快速发展,电力系统惯性相对减弱,电网承受频率扰动的能力变差。传统一次调频是基于本机频率偏差信号进行的反馈控制,其响应速度相对较慢,显然已不能满足系统频率快速变化的要求。若能采取一定的技术手段加速一次调频的动作,如在仅有惯性作用的时间段增加一次调频环节,则将对系统的稳定性发挥巨大的作用。这种采用一定技术手段加速后的一次调频被称为速动一次调频。

2.1 通信条件

随着电网通信技术的快速发展以及同步相量测量单元(PMU)在电力系统动态检测、系统保护、系统分析和预测等领域的应用,基于 PMU 的广域测量系统(WAMS)已经在我国电力系统中得到广泛使用,为缩短传统一次调频时间、实现速动一次调频提供技术基础。

通过对实际电网中不同位置频率和功角的监测,验证了扰动信号在电力系统中的传播速度比光速慢得多^[14]。扰动信号在电力系统中以机电波传播,其在通信网中的传播速度要比机电波快得多,可以预测不同发电机组接收频率扰动的的时间,并提前采取相应策略控制发电机出力^[15]。目前,我国大部分电网都安装了 PMU,广域网的通信在数据的采集和传输方面具有快速、可靠的优点,可以满足速动一

次调频的通信要求。

2.2 “速动”估算

传统一次调频动作时间包含 3 个部分:①频率扰动引起频率偏差传导到机端的时间;②频率偏差超过一次调频死区设定值的时间;③机组响应一次调频的时间。本文拟采用一定的技术手段缩短动作时间①、②,以实现速动一次调频。

频率扰动发生后,扰动在电力系统中以机电波的形式传播到不同发电机组机端,靠近扰动点的发电机组通信时间短、频率下降快,远离扰动点的发电机组通信时间长、频率下降慢、出力不充分,这导致电力系统中各个节点的频率分布不一致,具有明显的时空分布特性^[16-17]。频率扰动产生的频率偏差传导到机端的时间由频率时空分布特征引起,其取决于如下 2 个因素:①频率扰动事件的发生位置与机组之间的距离;②频率偏差的传播速度(机电波的传播速度)。由于通信网中信息的传播速度(接近光速)远大于机电波的传播速度(几百至几千 km/s),利用通信网实现速动一次调频方法在理论上具有一定的可行性。

通过简单测算,动作时间①大约为几十 ms 至 1 s;动作时间②大约为 1 s;动作时间③不超过 3 s。通常广域网的通信延迟为 ms 级,从扰动信号采集到事件发生再到指令下发到机组,整个过程所需时间为 100 ms 左右^[18],机组执行时间分析同上。由上述分析可知利用通信网实施速动一次调频控制,可加快 1~2 s。由前期研究可知,在随机电力系统中即使不采取速动一次调频控制方法而只是将一次调频提前 1 s 也可获得很好的效果。

3 基于事件触发的速动一次调频

3.1 基于事件触发的控制框架

传统的一次调频依靠发电机端频率偏差进行反馈控制,响应速度较慢。为此本文提出一种基于事件触发的速动一次调频技术方案,该方案基于通信网实现事件的收集和触发、控制指令的下发。在特定事件下,利用通信网进行事件触发启动可以缩短动作时间①、②,使具有一次调频能力的发电机组快速响应系统频率的变化,实现对系统频率变化的快速响应,提升(降低)频率的最低(高)点,保证系统安全稳定运行。

基于事件触发的速动一次调频包括在线计算-在线应用、离线分析-在线应用这 2 种控制模式。为了提升一次调频响应速度,本文采用离线分析-在线应用模式,如图 2 所示。进行离线分析时,对可能发生的频率扰动事件进行频率分布估计,判断是否满足触发条件,满足条件事件确定其一次调频控制方案,形成控制决策表。进行在线应用时,电力系统出

现频率扰动事件后将采集的事件信息与控制决策表中的事件进行匹配,若匹配成功,则通过通信网下发相应的控制策略,实施速动一次调频;若无匹配事件,则不启动速动一次调频,依据传统一次调频进行反馈控制。

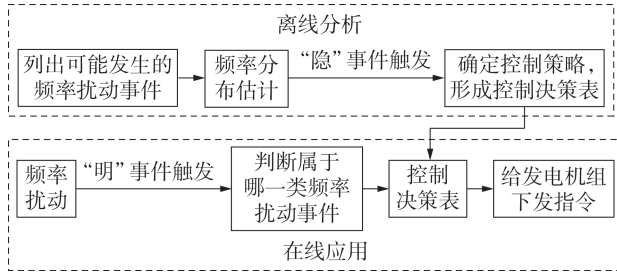


图2 速动一次调频框图

Fig.2 Block diagram of quick primary frequency regulation

速动一次调频中存在“隐”事件触发和“明”事件触发这2个环节:“隐”事件触发为进行离线分析时,确定某一频率扰动事件是否需要采取速动一次调频;“明”事件触发为进行在线应用时,将频率扰动事件的测量结果与决策表进行匹配,匹配成功则下发速动一次调频指令。

电力系统发生频率扰动事件后,由于系统各个节点的频率分布不一致,发电机的出力也不同。在下达指令环节,对不同的频率扰动事件进行离线分析,根据所得的分析结果判断机组是否参与速动一次调频。在线应用时根据控制决策表下达指令,此时所依据的触发条件为 $|\Delta f_g| > 0.033 \text{ Hz}$,其中 Δf_g 为第 g 台发电机的频率偏差。

3.2 频率分布估计

系统频率的变化可能是负荷增加/减少(有功缺额/过剩)造成的,也可能是输电线路短路故障等因素造成的。目前,在频率分布估计方面的研究已经取得了一定的成果,下面介绍一种基于直流潮流的频率分布估计方法^[19-20]。该方法的数学模型由直流潮流模型、发电机转子运动方程、负荷模型和网络方程构成,分别如式(1)~(4)所示。

$$P_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N B_{ij} (\theta_i - \theta_j) \quad (1)$$

$$\begin{cases} d\delta/dt = w - w_N \\ 2Hdw/dt = P_m - P_e - D(w - w_N) \end{cases} \quad (2)$$

$$P_L = P_0 (1 + K_p \Delta f) \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} P_e \\ P_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{GC} & B_{CL} \\ B_{LG} & B_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, P_i 为节点 i 注入的有功功率; B_{ij} 为支路 ij 的电纳, $j=1,2,\dots,N$, N 为节点总数; θ_i, θ_j 分别为节点 i, j 的电压相角; δ 为发电机转子角; w 为转子转速; w_N 为

转子额定转速; H 为发电机组转子惯性时间常数; P_m 为原动机机械功率; P_e 为发电机电磁功率; D 为阻尼系数; P_L 为负荷有功功率; P_0 为系统初始有功功率; K_p 为有功功率-频率系数; Δf 为负荷母线的频率偏差; P_e, P_L 分别为发电机、负荷节点注入的有功功率列向量; δ, θ 分别为发电机转子角、负荷节点电压相角列向量; $B_{GC}, B_{CL}, B_{LG}, B_{LL}$ 为电纳矩阵 B 的子矩阵。由式(4)可得:

$$\theta = B_{LL}^{-1} (P_L - B_{LG} \delta) \quad (5)$$

$$P_e = B_{GC} \delta + B_{CL} \theta \quad (6)$$

求解网络方程时,将 t 时刻的 P_L 和 δ 代入式(5)可得 θ ,再将 θ 和 δ 代入式(6)可得 P_e 。由式(2)、(3)、(5)、(6)迭代求解,可得系统出现频率扰动事件后各个节点的频率动态分布轨迹,该方法具有计算速度快、计算量小的优势,可以用于频率扰动事件后的快速频率响应分析。

3.3 控制策略

(1) 控制策略1。

根据估计的传统机组一次调频频率分布,对系统进行速动一次调频控制。系统发生频率扰动后,当系统频率超过频率偏差死区设置值时,一次调频机组根据估计的传统机组一次调频频率分布及时出力。发电机组一次调频的增发功率 $\Delta P_m(t)$ 为:

$$\Delta P_m(t) = K_C \Delta \tilde{f}(t+t') \quad (7)$$

其中, $\Delta \tilde{f}(t+t')$ 为发生频率扰动后发电机端的频率偏差量; K_C 为发电机的功频静特性系数。

一次调频死区是防止机组由于小频率偏差频繁动作而设置的阈值,控制策略1依据离线分析所形成的控制决策表进行提前控制,离线分析后可判断机组一次调频的启动情况,相当于取消一次调频死区。控制策略1在频率扰动发生时刻 t_0 至一次调频穿越死区的惯性作用阶段加入一次调频,加强了系统的惯性支撑,对频率的变化起到了一定的抑制作用,保证了系统的稳定性。

(2) 控制策略2。

在控制策略1的控制方式下,当系统频率偏差突破一次调频死区设定值时,再让发电机组利用传统的一次调频进行反馈控制。控制模型为:

$$\Delta P_m(t) = \begin{cases} K_C \Delta \tilde{f}(t+t') & t_0 < t \leq t_0 + t_c \\ K_C \Delta f(t) & t > t_0 + t_c \end{cases} \quad (8)$$

其中, t_c 为采用控制策略1时从频率扰动事件发生到频率偏差超过一次调频死区设定值的时间。为保证一次调频的快速性,在传统一次调频的死区区间加入功率前馈量 $\Delta P_{pre} \approx K_C \Delta \tilde{f}(t+t')$,此时调速器动作方向与加入 ΔP_{pre} 前一致,即可达到与控制策略2相同的控制效果。

控制策略1根据离线分析所得的控制决策表进

行控制,所依据的参量并不能很好地反映系统频率的实际偏差量,调节过程存在误差。控制策略 2 以控制策略 1 为基础,在系统频率偏差超过一次调频死区设定值后进行反馈控制。

4 算例仿真

4.1 仿真模型

本文采用典型的 2 区域 4 机系统模型如图 3 所示。同步发电机 $G_1 \sim G_4$ 的容量均为 900 MW, L_7 和 L_9 分别为区域 1 和区域 2 的系统负荷,其值分别为 961、1767 MW, C_7 和 C_9 为无功补偿装置。除 L_7 和 L_9 以外,仿真系统的具体参数设置均为模型中的默认值。

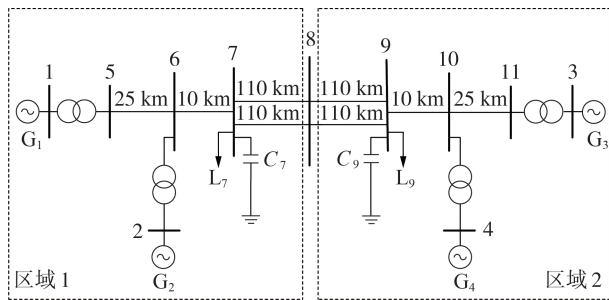


图 3 2 区域 4 机系统

Fig.3 Two-area four-machine system

4.2 仿真分析

第 10 s 时 L_9 突增 100 MW, 传统一次调频控制策略下系统中各发电机的动态频率响应分布见图 4。在系统发生频率扰动后, 区域 1 和区域 2 中, 靠近负荷点的发电机 G_3 、 G_4 转速下降得快, 频率跌落更为明显, 而远离负荷点的发电机 G_1 、 G_2 频率下降则较为缓慢, 频率跌落速度为 $G_4 > G_3 > G_2 > G_1$, 这就导致了电网中各个发电机端的节点频率变化不一致, 具有时空分布特性。

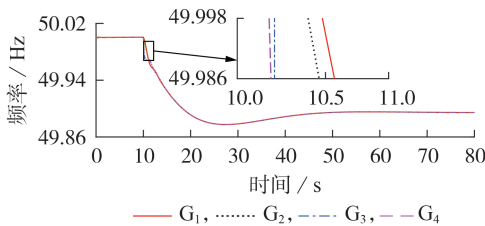


图 4 L_9 突增时各发电机的频率分布

Fig.4 Frequency distribution of generators when L_9 increases suddenly

在该频率扰动事件下, 分别采用传统一次调频、控制策略 1 和控制策略 2 进行控制, 以 G_3 为例, 得到的频率动态响应结果见图 5。由图 5 可知, 采用传统一次调频、控制策略 1 和控制策略 2 后, 频率偏差超过一次调频死区设定值的时间分别为 10.433、10.45、10.45 s, 频率动态响应曲线最低点对应的坐标分别

为 (27.383, 49.877)、(24.45, 49.914)、(24.517, 49.913), 达到稳态时对应的坐标分别为 (57.5, 49.895)、(54.367, 49.931)、(54.917, 49.93)。

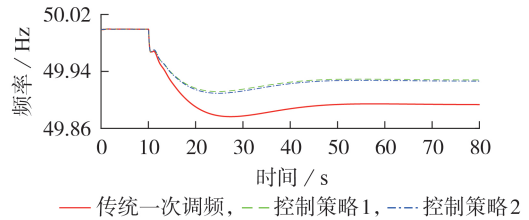


图 5 L_9 突增时不同控制策略下的频率动态响应

Fig.5 Frequency dynamic response under different control strategies when L_9 increases suddenly

第 10 s 时 L_9 突减 100 MW, 此时系统仿真结果见附录 B 图 B1、图 B2 和表 B1。分析上述结果可知, 由于控制策略 1 和控制策略 2 在发生频率扰动后都增强了一次调频的惯性支撑环节, 使得频率偏差超过一次调频死区设定值、频率动态响应曲线最低点和达到稳态时的时间分别发生如下变化: ①采用控制策略 1 和控制策略 2 后一次调频惯性作用的增强, 延缓了频率偏差超过一次调频死区设定值的时间, 二者消耗的时间相同, 较传统一次调频存在一定延时, 在一定程度上减缓频率扰动对系统的冲击, 增强系统的稳定性; ②采用控制策略 1 后, 对频率动态响应曲线最低点的频率提升效果最好, 能在很大程度上避免低频减载等事故的发生; ③采用控制策略 1 和控制策略 2 后, 频率动态响应曲线稳定后的频率值相差不大, 所消耗的时间不同, 采用控制策略 1 后, 频率动态响应曲线的频率稳定值最接近 50 Hz, 且耗时最短。

L_9 突增和突减时的发电机机械功率变化分别见图 6 和附录 B 图 B3。由图 6 可知, 3 种控制策略下发电机最终的机械功率稳定值基本一致, 但到达稳态的时间有所不同, 采用控制策略 1、控制策略 2 和传统一次调频后所消耗的时间依次递增。

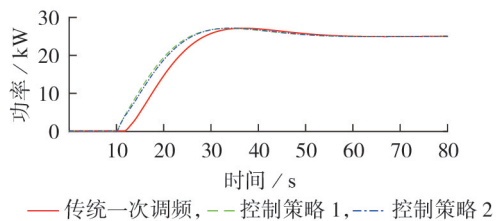


图 6 L_9 突增时发电机机械功率变化值

Fig.6 Change value of generator mechanical power when L_9 increases suddenly

L_9 突增时, 采用传统一次调频、控制策略 1 和控制策略 2 后发电机的输出能量分别为 2.66×10^{-4} p.u.、 2.64×10^{-4} p.u. 和 2.71×10^{-4} p.u.; L_9 突减时, 采用传统

一次调频、控制策略1和控制策略2后发电机的输出能量分别为 -2.73×10^{-4} p.u.、 -2.68×10^{-4} p.u.和 -2.71×10^{-4} p.u.。系统发生频率扰动后,3种控制策略下频率达到准稳态时发电机输出的能量相差不大,控制策略1和控制策略2在传统一次调频的基础上得到了不同的优化。其中,控制策略2虽然增强了惯性支撑环节,但是在后续调整过程中依靠传统的一次调频反馈控制,相较于控制策略1,延长了频率动态响应曲线的稳定时间;控制策略1对频率动态响应曲线中频率最低点的改善效果最好,稳定后频率更接近50 Hz且耗时最短。

由前述实验结果分析可知,当系统发生频率扰动后,不同控制策略响应的快慢存在差异,以 L_0 突增为例,频率的测量、传播及时间如附录B表B2所示。由表B2可知,利用通信网传递频率偏差信号可以节约机组的调差时间,距离越远其优势越大。

4.3 含风电电力系统算例分析

在含风电等新能源的电力系统中,针对新能源并网后系统惯性降低对系统频率的影响,常规同步发电机组采用速动一次调频控制,风电等新能源仅对电力系统输送功率,暂不考虑机组的惯量控制及配合同步发电机组的速动一次调频。

将图3中 G_4 替换为同等容量大小的风电场(包含180台5 MW双馈风力发电机),对含风电电力系统的速动一次调频系统进行仿真分析,具体分析及结果详见附录C。可知本文所提策略能在快速响应系统频率变化的同时,改善频率响应曲线的频率最低值和稳态值,从而提高系统的稳定性。

5 结论

本文提出了一种基于事件触发的速动一次调频方法,并给出触发后的单机速动调频控制策略。在当前风电等新能源大规模接入电网引起电网转动惯量减小、一次调频能力减弱的情形下,通过离线分析-在线应用的方式,更快地响应系统频率变化和提供一定的惯量支撑,使系统更快和更稳定地应对系统频率的变化,保证系统安全稳定的运行。根据理论分析和仿真结果可得如下结论。

(1)基于事件触发的速动一次调频能够快速响应频率扰动,改善频率响应曲线中频率的波动,缩短系统恢复稳定的时间。

(2)相较于较传统一次调频,控制策略1对于频率响应曲线波动的改善效果更好,达到稳态的耗时最短、其值更接近50 Hz。这说明该控制策略不仅可以快速响应系统频率变化,缩短了一次调频的耗时,还能够一定程度上减轻二次调频的负担和降低发电机的出力,提高了系统稳定性,具有更高的经济性。

(3)采用控制策略2时,系统的频率稳定值与控制策略1相比相差不大,但其耗时有所延长。当频

率偏差超出一次调频死区设定值时,控制策略2依旧依靠系统频率的实时变化值进行控制,减少发电机组一次调频的负担。这说明控制策略2在快速响应系统的频率变化的同时,可减少频率扰动对系统的冲击,保护了电网安全稳定的运行。

本文基于事件触发的方式对速动一次调频进行研究,并取得了初步的成果,后续将结合机组特性等对一次调频策略进行进一步优化,制定最优控制策略,并进一步考虑风电等新能源并网后参与速动一次调频的方法与策略。

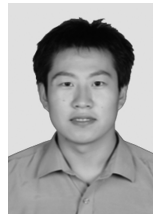
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):1-8.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8.
- [2] 陈国平,李明节,许涛,等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):20-26.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26.
- [3] 索之闻,刘建琴,蒋维勇,等. 大规模新能源直流外送系统调相机配置研究[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):124-129.
SUO Zhiwen, LIU Jianqin, JIANG Weiyong, et al. Research on synchronous condenser configuration of large-scale renewable energy DC transmission system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 124-129.
- [4] 秦晓辉,苏丽宁,迟永宁,等. 大电网中虚拟同步发电机惯量支撑与一次调频功能定位辨析[J]. 电力系统自动化,2018,42(9):36-43.
QIN Xiaohui, SU Lining, CHI Yongning, et al. Functional orientation discrimination of inertia support and primary frequency regulation of virtual synchronous generator in large power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 36-43.
- [5] 廖金龙,陈波,丁宁,等. 大功率机组一次调频参数优化研究[J]. 热力发电,2018,47(5):22-28.
LIAO Jinlong, CHEN Bo, DING Ning, et al. Research on the optimization of primary frequency modulation parameters of high power units [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 22-28.
- [6] 吴忠强,张伟,李峰,等. 基于云神经网络自适应逆系统的电力系统负荷频率控制[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):86-91,98.
WU Zhongqiang, ZHANG Wei, LI Feng, et al. Load frequency control of power system based on cloud neural network adaptive inverse system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 86-91, 98.
- [7] 史华勃,陈刚,丁理杰,等. 兼顾一次调频性能和超低频振荡抑制的水轮机调速器PID参数优化[J]. 电网技术,2019,43(1):221-226.
SHI Huabo, CHEN Gang, DING Lijie, et al. PID parameter optimization of hydro turbine governor considering the primary frequency regulation performance and ultra-low frequency oscillation suppression [J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 221-226.
- [8] 廖金龙,陈波,丁宁,等. 考虑一次调频能力的火电机组负荷优

- 化分配[J]. 中国电机工程学报,2018,38(增刊1):168-174.
LIAO Jinlong, CHEN Bo, DING Ning, et al. Load optimal distribution of thermal units considering primary frequency control ability[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(Supplement 1):168-174.
- [9] 丁宁, 廖金龙, 陈波, 等. 大功率火电机组一次调频能力仿真与试验[J]. 热力发电, 2018, 47(6):85-90.
DING Ning, LIAO Jinlong, CHEN Bo, et al. Primary frequency control ability of thermal power units with large capacity: simulation and experiment[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(6):85-90.
- [10] 金娜, 刘文颖, 曹银利, 等. 大容量机组一次调频参数对电网频率特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1):91-95, 100.
JIN Na, LIU Wenyong, CAO Yinli, et al. Influence on the grid frequency characteristic by the parameters of primary frequency modulation of large capacity generator units[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1):91-95, 100.
- [11] 徐衍会, 王珍珍, 翁洪杰. 一次调频与动态稳定协调优化[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7):139-143.
XU Yanhui, WANG Zhenzhen, WENG Hongjie. Optimal coordination between primary frequency regulation and dynamic stability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7):139-143.
- [12] 刘吉臻, 王耀函, 曾德良, 等. 凝结水节流参与的超超临界机组一次调频控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24):7216-7222.
LIU Jizhen, WANG Yaohan, ZENG Deliang, et al. A primary frequency regulation method of USC units based on condensate throttling[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24):7216-7222.
- [13] 国家能源局. 电力系统网源协调技术规范: DL/T 1870—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [14] SURYAWANSHI P, DAMBHARE S, PRAMANIK A. Detection of electromechanical wave propagation using synchronized phasor measurements[J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2014, 15(1):69-75.
- [15] 夏成军, 华夏, 谢家正. 电力系统机电扰动传播研究综述[J]. 电网技术, 2019, 43(4):1361-1370.
XIACHENGJUN, HUA Xia, XIE Jiazheng. A review of propagation of electromechanical disturbance in power systems[J]. Power System Technology, 2019, 43(4):1361-1370.
- [16] 张恒旭, 刘玉田. 电力系统动态频率响应时空分布特征量化描述[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7):64-70.
ZHANG Hengxu, LIU Yutian. Quantitative description of space-time distribution features of dynamic frequency responses[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7):64-70.
- [17] 孙伟卿, 田坤鹏, 谈一鸣, 等. 考虑灵活性需求时空特性的电网调度计划与评价[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7):168-174.
SUN Weiqing, TIAN Kunpeng, TAN Yiming, et al. Power grid dispatching plan and evaluation considering spatial and temporal characteristics of flexibility demands[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7):168-174.
- [18] 胡志祥, 谢小荣, 肖晋宇, 等. 广域测量系统的延迟分析及其测试[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15):39-43.
HU Zhixiang, XIE Xiaorong, XIAO Jinyu, et al. Analysis and test on delays in the wide area measuring system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15):39-43.
- [19] 李常刚, 刘玉田, 张恒旭, 等. 基于直流潮流的电力系统频率响应分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34):36-41.
LI Changgang, LIU Yutian, ZHANG Hengxu, et al. Power system frequency response analysis based on the direct current loadflow[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34):36-41.
- [20] 张恒旭, 李常刚, 刘玉田, 等. 电力系统动态频率分析与应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11):169-176.
ZHANG Hengxu, LI Changgang, LIU Yutian, et al. Studies on assessment and control of power system transient frequency stability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11):169-176.

作者简介:



孟庆伟

孟庆伟(1985—),男,山东青岛人,博士,主要研究方向为电力系统稳定控制、分析、评价及AGC性能评价、能源互联系统的分析等(E-mail:mqw@upc.edu.cn);

肖尧(1991—),男,湖北恩施人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定控制与分析(E-mail:z16050421@s.upc.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Quick primary frequency regulation method and control strategy based on event trigger

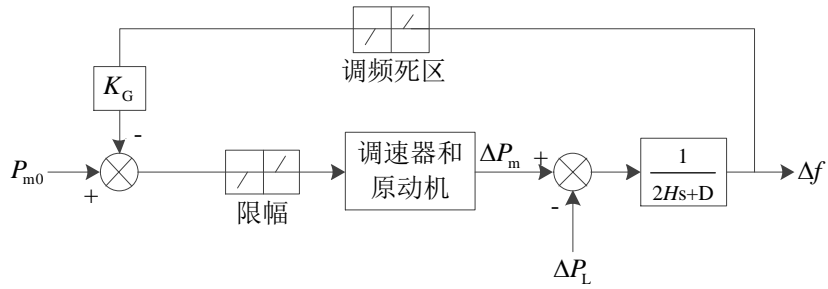
MENG Qingwei, XIAO Yao, CHEN Hongzhou

(College of New Energy, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: In the condition of relatively weak system inertia, the quick primary frequency regulation technique is particularly important to maintain the system stability. Based on the primary frequency regulation of traditional power plant, the concept of quick primary frequency regulation is put forward by using the characteristic that the propagation speed of frequency disturbance signal in communication network is faster than that in power grid. In order to improve the system stability, a primary frequency regulation control is added in the traditional inertial action area. To realize quick primary frequency regulation, a quick primary frequency regulation method of the whole network with event trigger control is proposed, and a single machine quick primary frequency modulation control strategy after the event trigger is given. The two-area four-machine system model is built for comparative simulation, the results show that the proposed method can speed up the frequency stability recovery and reduce the frequency fluctuation amplitude.

Key words: frequency regulation; quick primary frequency regulation; event trigger; inertia of power system; two-area four-machine system model

附录 A



注： P_{m0} 为扰动事件发生前发电机的有功功率。

图 A1 传统一次调频框图

Fig.A1 Block diagram of traditional primary frequency regulation

附录 B

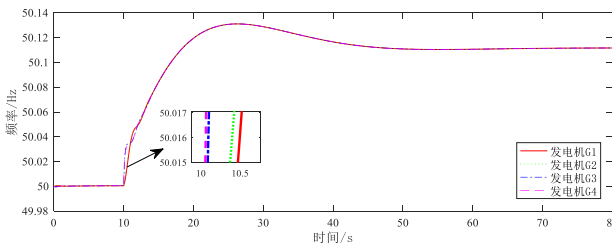


图 B1 负荷突减时各发电机的频率分布

Fig.B1 Frequency distribution of generators with sudden load decrease

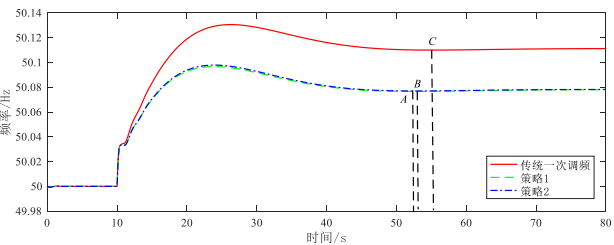


图 B2 负荷突减时不同策略下的频率动态响应

Fig.B2 Frequency dynamic response under different strategies in case of sudden load decrease

表 B1 负荷 L_0 突减时 3 种策略控制效果对比

Table B1 Comparison of control effects of three strategies when L_0 decreases suddenly

控制策略	频率频差超过死区设定值时间/s	频率特性曲线最低点坐标	频率特性曲线稳定点坐标
传统一次调频	10.429	(50.131, 26.250)	(50.110, 55.183)
控制策略 1	10.450	(50.097, 23.900)	(50.076, 52.516)
控制策略 2	10.450	(50.098, 23.933)	(50.077, 52.850)

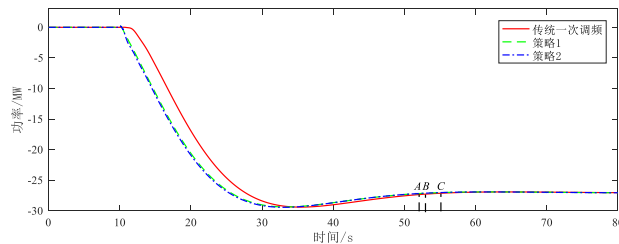


图 B3 负荷突减时发电机机械功率变化值

Fig.B3 Change value of mechanical power of generator during sudden load decrease

表 B2 负荷 L_0 突增时频率的测量、传播及时间差

Table B2 Measurement, transmission and time difference of frequency when L_0 decreases suddenly

发电机	L/km	T_1/ms	T_2/ms	T_{12}/ms	T/ms	T'/ms
G_3	35	35	约 100	-65	430	365
G_1	255	255	约 100	155	1 100	1 255

注： L 为发电机距离 L_0 的距离； T_1 、 T_2 为频率信息采用自然传导和通信 2 种方式的用时； T_{12} 为采用通信方式节约的时间； T 为采取本文策略后的节约时间； T' 为相较于传统一次调频方法本文策略的总节约时间。

附录 C

为了说明风电并网对系统频率的影响,仅第 10 s 时考虑 L_9 突增 100 MW,图 C1 和图 C2 分别为频率响应特性曲线和功率响应特性曲线。由图可知,随着风电等新能源的大规模并网,传统同步发电机在系统中的占比逐渐减少,系统惯性相对降低,在发生同等的频率扰动事件时,传统控制方式下,含风电系统的频率变化速率更快、最低点更低,发电机的出力相对更多,增加了发电机的负担,不利于系统安全稳定的运行。

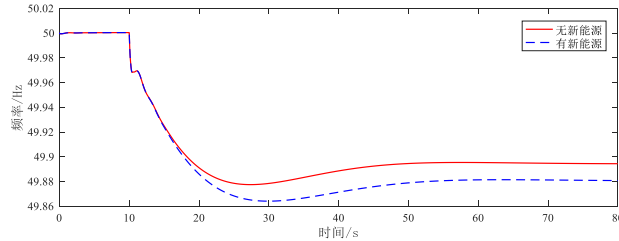


图 C1 频率响应曲线

Fig.C1 Curves of frequency response

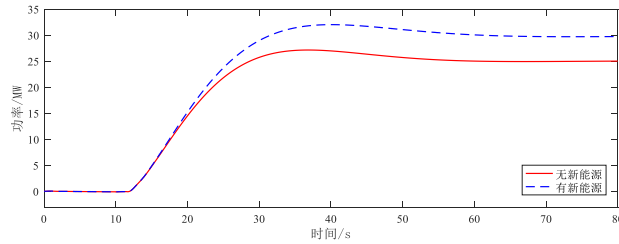


图 C2 功率响应曲线

Fig.C2 Curves of power response

相较于传统控制方式,本文采用的速动一次调频,是在不增加发电机最终出力的情形下,在传统一次调频惯性作用区加入一定量一次调频,快速响应系统频率的变化提高系统稳定性,不同策略下的频率动态响应如图 C3 所示,具体频率如表 C1 所示。本文所提方法策略在含风电的电力系统中,能够在一定程度上改善频率响应特性曲线的频率最小值和稳定值。

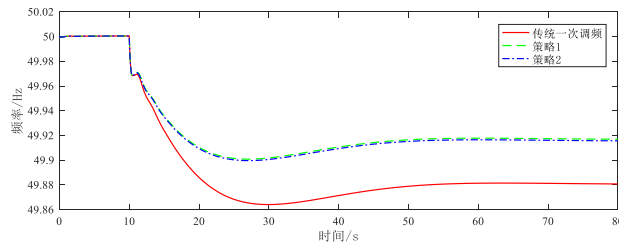


图 C3 不同策略下的频率动态响应

Fig.C3 Frequency dynamic response under different strategies

表 C1 不同策略控制效果对比

Table C1 Comparison of control effects among different strategies

控制策略	频率最小值/Hz	频率稳定值/Hz
传统一次调频	49.864	49.881
控制策略 1	49.901	49.917
控制策略 2	49.900	49.916