

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210245

考虑频率稳定的新能源高渗透率电力系统最小惯量与一次调频容量评估方法

李东东¹, 孙雅茹¹, 徐波¹, 张佳乐², 刘强¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司, 上海 200090)

摘要: 随着新能源渗透率逐步提高, 系统在大功率扰动下的频率稳定问题日益严峻, 限制了系统新能源的消纳能力。为了合理规划新能源的接入容量, 亟需对系统的最小惯量和一次调频容量进行评估。为此, 针对大功率扰动下惯量响应与一次调频响应间的相互作用进行了研究。首先, 以传统单机模型为基础, 推导出了计及调频死区的频率响应过程表达式。然后, 以扰动后的最低频率限值为动态频率稳定约束条件, 建立了系统最小惯量与一次调频容量评估模型, 估算了系统最小功频静态特性系数和最小惯性时间常数, 计算并绘制了惯量响应和一次调频响应的功率曲线。最后, 在DIGSILENT PowerFactory仿真软件中搭建了IEEE 10机39节点模型, 验证了所提最小惯量与一次调频容量评估方法的准确性和研究价值。

关键词: 高渗透率电力系统; 惯量响应; 一次调频响应; 频率稳定

Minimum inertia and primary frequency capacity assessment for a new energy high permeability power system considering frequency stability

LI Dongdong¹, SUN Yaru¹, XU Bo¹, ZHANG Jiale², LIU Qiang¹

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200090, China)

Abstract: With the gradual increase of new energy permeability, a system's frequency stability problem under high power disturbance is increasingly serious. This limits the absorption capacity of the system's new energy. In order to reasonably plan the access capacity of new energy, it is necessary to evaluate the minimum inertia and primary frequency capacity of the system. Therefore, the interaction between inertia response and primary frequency response under high power disturbance is studied. First, based on the traditional stand-alone model, the expression of the frequency response process considering the frequency dead band is derived. Then, taking the minimum frequency limit after disturbance as the dynamic frequency stability constraint, minimum inertia and primary frequency capacity evaluation models are established, and the minimum power/frequency characteristic and inertia time constant of the system are estimated, and the power curves of inertia and primary frequency responses are calculated and plotted. Finally, the IEEE 10-machine 39-bus model is built in the simulation software of the DIGSILENT PowerFactory. The accuracy and research value of the method of minimum inertia and primary frequency capacity evaluation are verified.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977128).

Key words: high permeability power system; inertia response; primary frequency response; frequency stability

0 引言

近年来, 电力系统逐步从传统火电机组向风、光等新能源发电转型, 煤炭污染问题得到了有效的

治理。我国承诺二氧化碳排放力争在2030年之前达到峰值, 努力争取在2060年之前实现碳中和。因此, 积极推动新能源替代化石能源是今后的重点任务之一, 新能源发电是未来电力系统发展的必然趋势^[1-5]。

以风能为代表的新能源, 一般通过电力电子变换器接入电网, 从而导致与电网解耦, 在有功功率

扰动下无法主动为电网提供惯量支撑^[6-8]。同时, 新能源机组遵循最大功率跟踪控制向电网输送功率, 当系统中发生较大的功率扰动时, 无法像传统机组那样通过原动机调速系统来增加机组的输出功率为系统提供有功支撑, 系统的一次调频能力降低^[9-11]。因此, 对于新能源渗透率较高的电力系统而言, 频率稳定问题已成为限制电网新能源渗透率提升的主要因素^[12-14], 研究频率稳定约束条件下的最小惯量与一次调频容量对电网的安全稳定运行具有重要意义。

为了应对高比例新能源接入给电力系统频率稳定带来的挑战, 国内外学者针对惯量和一次调频响应展开了深入的研究。文献[15]通过发电机转子运动方程、扰动功率大小及频率采样数据计算电力系统惯性时间常数。惯量评估为衡量高渗透率新能源电力系统抗扰能力提供了依据^[16]。目前, 直接针对系统最小惯量评估的研究仍不完善。相关文献通常以惯量响应阶段的频率变化率保护动作阈值为关键指标估算电力系统惯量临界值^[17-18], 未考虑最低频率的影响。为满足频率控制所需的最小同步惯量, 文献[19]提出了一种同步惯性约束的经济调度算法, 以此满足频率控制所需的最小同步惯量。文献[20]研究了一次调频过程中发电机组功频静态特性系数和调速器死区对电网频率稳定的影响。对于一次调频容量的估算, 传统算法一般通过惯量评估计算惯量响应所提供的功率支撑来量化一次调频容量^[21-23], 缺乏直接的计算。文献[24]对惯量响应和一次调频响应的控制规律、能量变化和功频定位进行了辨析。然而, 上述研究缺乏对最小惯量和最小一次调频容量的量化研究, 未关注惯量响应和一次调频响应之间的相互作用以及协调配合。且现有的频率响应模型中缺少对调频死区的定量分析^[25-27], 忽略死区的模型往往对频率偏差给出更快速的响应。建立调频死区、惯量响应、一次调频响应与频率的关系模型, 有助于提高动态频率响应曲线计算的准确性。

因此, 本文在传统单机模型的基础上, 通过时域解析, 推导了系统发生功率缺额后“惯量响应-调频死区-一次调频”的全周期频率动态过程, 得出了计及一次调频死区的频率响应时域表达式。从电力系统频率稳定的角度出发, 以最低频率限值为动态频率稳定约束条件, 建立了大扰动下系统最小惯量与一次调频容量评估模型, 分别估算了系统最小惯量和一次调频容量。最后在 DIgSILENT Powerfactory 仿真软件中以 IEEE 10 机 39 节点为模型进行了验证。

1 电力系统频率响应

1.1 频率响应动态过程

当电力系统的电源与负荷平衡遭到破坏时, 传统发电机组参与电网调频按时间顺序可分为惯量响应、一次调频响应和二次调频响应, 在不同时间尺度上采用不同的方法对功率不平衡量进行调整^[28-29]。如图 1 所示, 将系统的频率响应过程分为三个阶段。

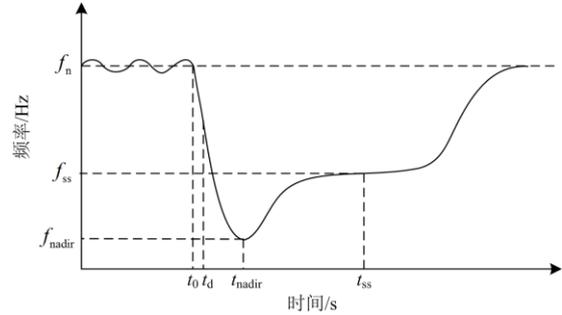


图 1 电力系统频率响应曲线

Fig. 1 Frequency response curve of power system

阶段 1: $t_0 \sim t_{nadir}$ 为系统惯量响应阶段。同步发电机的转子具有转动惯量, 在旋转过程中存储了动能。当系统出现机械功率与电磁功率不平衡时, 同步发电机的转子通过加速或减速将其储存的动能通过功角特性转化为电磁功率(即惯量响应功率)向系统释放或吸收, 从而影响发电机的不平衡功率进而影响频率变化。对于单台同步发电机组, 在惯量响应过程中由动能转化而来的惯量支撑功率始终等于机械功率与电磁功率的偏差, 扰动瞬间其支撑功率为发电机承担的扰动功率, 根据转子运动方程

$$\frac{2H_i S_i}{f_n} \frac{df(t)}{dt} = P_{mi} - P_{ei} \quad (1)$$

式中: H_i 为发电机惯性时间常数; S_i 为发电机额定容量; f_n 为电网额定频率; P_m 、 P_e 为发电机机械功率和电磁功率。

阶段 2: $t_d \sim t_{ss}$ 为一次调频响应阶段。在 t_d 时刻, 频率偏差超过死区下限, 调速器按照整定的功频静态特性发出调节信号, 增大原动机阀门开度, 增加向系统机械功率的注入, 与此同时惯量响应功率随之减小。在频率拐点时刻, 不平衡功率降为零, 频率停止下降, 即到达频率最低点。此后, 惯量响应功率由正变负。在一次调频容量充足的前提下, 机组持续增加有功输出, 转子吸收能量, 频率逐渐上升, 系统频率在 t_{ss} 时刻达到新的平衡, 维持在较低的频率水平, 机械功率不再增加。

阶段 3: t_{ss} 后为二次调频响应阶段。由于一次调频为有差调节, 若稳态频率偏差过大, 则二次调频启动, 调频厂增加有功出力, 调节频率恢复至额定值。

1.2 电力系统频率动态特性分析模型

频率响应曲线是频率稳定研究的核心, 频率稳定问题主要关注电网频率的平均变化过程, 为定量描述电网动态频率轨迹, 以传统单机模型为基础^[30], 推导出了计及调频死区的频率响应过程表达式来分析系统平均频率的动态变化过程。

在发生扰动后的瞬间, 即 $t_0 \sim t_d$ 阶段, 调速系统由于死区的设置没有动作, 机组一次调频能力不起作用, 频率响应模型可表示为

$$2H \frac{d\Delta f}{dt} + D\Delta f = \Delta P_0 \quad (2)$$

式中: H 为系统等效惯性时间常数; D 为系统阻尼系数; Δf 为系统频率偏差标么值; $\Delta P_0 = P_m - P_e$ 为系统初始功率扰动量标么值。

可以得到发生扰动后瞬间频率响应的表达式为

$$\Delta f(t) = \frac{\Delta P_0}{D} (1 - e^{-\frac{D}{2H}t}) \quad (3)$$

本文采用图 2 所示的死区特性, $\Delta f'$ 为系统频率偏差经过调频死区后的值^[31]。假设在 t_d 时刻系统频率偏差超过一次调频死区 Δf_d , 在 $t_d \sim t_{ss}$ 阶段频率响应模型可表示为式(4)。

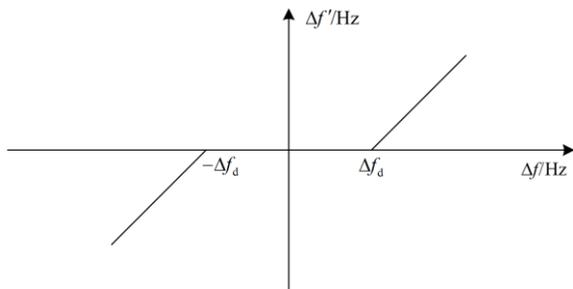


图 2 调频死区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of frequency dead band

$$\begin{cases} 2H \frac{d\Delta f}{dt} + D\Delta f = \Delta P_0 + \Delta P_G \\ T_m \frac{d\Delta P_G}{dt} + \Delta P_G = -K_G(\Delta f - \Delta f_d) \end{cases} \quad (4)$$

式中: ΔP_G 为出现频率偏差后在调速器的作用下原动机增加的机械功率标么值; T_m 为调速系统综合时间常数; K_G 为发电机组功频静态特性系数 ($K_G = 1/\delta$, δ 为调速器的调差系数); Δf_d 为一次调频死区。

可以得到一次调频切入后系统频率响应的表达

式为

$$\Delta f(t) = A_m e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi) + \frac{\Delta P_0 + K_G \Delta f_d}{D + K_G} \quad (5)$$

式中:

$$\alpha = \frac{2H + DT_m}{4HT_m}; \quad \omega = \frac{\sqrt{8HT_m K_G - (2H - DT_m)^2}}{4HT_m};$$

$$A_m = \frac{(\Delta P_0 - D\Delta f_d) \sqrt{A_1^2 + A_2^2}}{2H(D + K_G) \omega e^{-\alpha t_d}},$$

$$A_1 = 2H(\alpha \sin \omega t_d - \omega \cos \omega t_d) - (D + K_G) \sin \omega t_d,$$

$$A_2 = 2H(-\omega \sin \omega t_d - \alpha \cos \omega t_d) + (D + K_G) \cos \omega t_d,$$

$$t_d = \ln\left(\frac{\Delta P_0}{\Delta P_0 - D\Delta f_d}\right)^{\frac{2H}{D}}; \quad \varphi = \arctan \frac{A_1}{A_2}.$$

综上, 计及一次调频死区的系统频率响应时域表达式为

$$\Delta f(t) = \begin{cases} \frac{\Delta P_0}{D} (1 - e^{-\frac{D}{2H}t}) & \Delta f(t) \leq \Delta f_d \\ A_m e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi) + \frac{\Delta P_0 + K_G \Delta f_d}{D + K_G} & \Delta f(t) > \Delta f_d \end{cases} \quad (6)$$

2 惯量响应与一次调频响应相互作用研究

2.1 频率响应指标

在频率动态响应过程中, 最低频率 (f_{nadir}) 和动态结束后的稳态频率 (f_{ss}) 对系统的安全稳定至关重要^[32]。

稳态频率由功率不平衡大小和机组一次调频共同决定, 与系统的惯量水平无关, 反映了扰动后到达新的频率平衡点的稳定性。而初始不平衡功率一定时, 到达频率最低点时间及其对应的最大频率偏差除受惯量响应的影响外, 还取决于机组的一次调频能力。即最低频率主要是由系统惯量响应和一次调频响应共同作用下的频率最低点, 是本文关注的重点。

在系统发生功率缺额情况下, 低惯量系统频率变化速度较快, 频率跌落幅度较大, 一旦频率跌落至低频减载保护装置整定值, 减载动作将引发系统大面积停电。为了避免频率下降触发低频减载保护装置, 要求最低点的频率高于触发低频减载保护装置动作的频率限值, 该约束可以表示为

$$f_{nadir} \geq f_{UFLS} \quad (7)$$

式中: f_{nadir} 为最低频率; f_{UFLS} 为低频减载动作整定值。

2.2 最小一次调频容量估算

由(7)可知, 系统允许最大频率偏差为

$$\Delta f_{\max} = f_{\text{UFLS}} - f_n \quad (8)$$

在系统惯量响应功率一定时, 即惯性时间常数不变的情况下, 以系统允许最大频率偏差为频率稳定约束条件, 计算最小发电机组功频静态特性系数 $K_{G\min}$, 进而得出系统最小一次调频容量。

假设在时间 t_{\max} 时刻, 系统出现最大允许频率偏差 Δf_{\max} , 根据式(6)可得

$$\Delta f_{\max} = A_m e^{-\alpha t_{\max}} \sin(\omega t_{\max} + \varphi) + \frac{\Delta P_0 + K_{G\min} \Delta f_d}{D + K_{G\min}} \quad (9)$$

式中:

$$\omega = \frac{\sqrt{8HT_m K_{G\min} - (2H - DT_m)^2}}{4HT_m};$$

$$A_m = \frac{(\Delta P_0 - D\Delta f_d) \sqrt{A_1^2 + A_2^2}}{2H(D + K_{G\min}) \omega e^{-\alpha t_d}},$$

$$A_1 = 2H(\alpha \sin \omega t_d - \omega \cos \omega t_d) - (D + K_{G\min}) \sin \omega t_d,$$

$$A_2 = 2H(-\omega \sin \omega t_d - \alpha \cos \omega t_d) + (D + K_{G\min}) \cos \omega t_d;$$

$$\varphi = \arctan \frac{A_1}{A_2}.$$

而当出现最大频率偏差, 即在频率最低点时刻时, $d\Delta f / dt = 0$, 由式(5)可以得到

$$-\alpha \sin(\omega t_{\max} + \varphi) + \omega \cos(\omega t_{\max} + \varphi) = 0$$

解得频率最低点时间为

$$t_{\max} = \frac{1}{\omega} (\arctan \frac{\omega}{\alpha} - \varphi) \quad (10)$$

式(9)、式(10)组成含有未知数 $K_{G\min}$ 和 t_{\max} 的方程组。

由此, 可计算系统最小一次调频容量 $\Delta P_G(t)$ 为

$$\Delta P_G(t) = \frac{A_m K_{G\min} (\alpha T_m - 1)}{(1 - \alpha T_m)^2 + \omega^2 T_m^2} e^{-\alpha t} \left[\sin(\omega t + \varphi) - \frac{\omega T_m}{1 - \alpha T_m} \cos(\omega t + \varphi) \right] + \frac{A_m K_{G\min} (1 - \alpha T_m)}{(1 - \alpha T_m)^2 + \omega^2 T_m^2} e^{-\alpha t_d} \left[\sin(\omega t_d + \varphi) - \frac{\omega T_m}{1 - \alpha T_m} \cos(\omega t_d + \varphi) \right] \quad (11)$$

2.3 最小惯量响应估算

在系统一次调频容量一定时, 即发电机功频静态特性系数不变的情况下, 以系统允许最大频率偏差为频率稳定的约束条件, 计算最小惯性时间常数 H_{\min} , 进而可得出系统最小惯量响应。

假设在时间 t_{\max} 时刻, 系统出现最大允许频率偏差 Δf_{\max} , 根据式(6)可得

$$\Delta f_{\max} = A_m e^{-\alpha t_{\max}} \sin(\omega t_{\max} + \varphi) + \frac{\Delta P_0 + K_G \Delta f_d}{D + K_G} \quad (12)$$

式中:

$$\alpha = \frac{2H_{\min} + DT_m}{4H_{\min} T_m};$$

$$\omega = \frac{\sqrt{8H_{\min} T_m K_G - (2H_{\min} - DT_m)^2}}{4H_{\min} T_m};$$

$$A_m = \frac{(\Delta P_0 - D\Delta f_d) \sqrt{A_1^2 + A_2^2}}{2H_{\min} (D + K_G) \omega e^{-\alpha t_d}},$$

$$A_1 = 2H_{\min} (\alpha \sin \omega t_d - \omega \cos \omega t_d) - (D + K_G) \sin \omega t_d,$$

$$A_2 = 2H_{\min} (-\omega \sin \omega t_d - \alpha \cos \omega t_d) + (D + K_G) \cos \omega t_d,$$

$$t_d = \ln \left(\frac{\Delta P_0}{\Delta P_0 - D\Delta f_d} \right)^{\frac{2H_{\min}}{D}}; \quad \varphi = \arctan \frac{A_1}{A_2}.$$

此时, 频率达到最低点的时刻为

$$t_{\max} = \frac{1}{\omega} (\arctan \frac{\omega}{\alpha} - \varphi) \quad (13)$$

式(12)、式(13)组成含有未知数 H_{\min} 和 t_{\max} 的方程组。

由此, 可计算最小惯量响应功率 $\Delta P_H(t)$ 为

$$\Delta P_H(t) = 2H_{\min} A_m \sqrt{\alpha^2 + \omega^2} e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi) \quad (14)$$

式中, $\varphi = \varphi - \arctan \frac{\omega}{\alpha}$ 。

3 仿真实验

3.1 仿真模型

为验证所提方法的准确性, 采用 IEEE 10 机 39 节点系统作为仿真模型, 仿真环境为 DIgSILENT Powerfactory。系统模型如图 3 所示。其包含 10 台发电机、39 个母线、12 台变压器、34 条线路。其中 1 号机为外部电网的等值机, 2 号机为平衡机。各发电机额定参数如表 1 所示。

算例系统额定频率为 50 Hz, 低频减载动作整定值 f_{UFLS} 为 49.2 Hz, 可得系统允许最大频率偏差 $\Delta f_{\max} = -0.8$ Hz, 一次调频死区 -0.033 Hz。由于系统在正常运行时, 单一机组跳闸故障的暂态频率稳定指标较高, 不会导致系统暂态频率失稳^[33]。为保证一次调频动作且获得较明显的频率响应, 本文设置系统中发生 -0.15 p.u., -0.17 p.u., -0.20 p.u. 的功率扰动来模拟较严重的频率偏移事故。

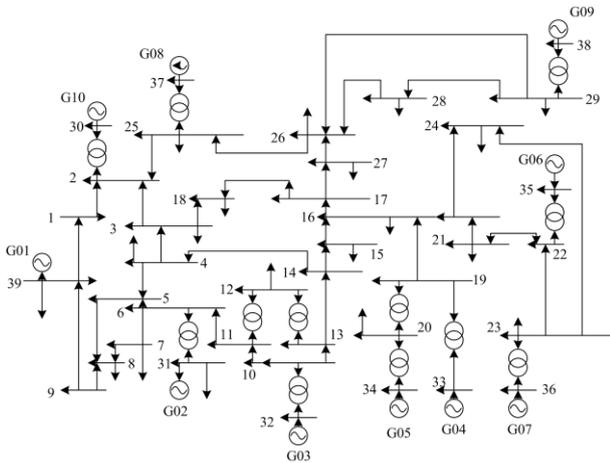


图3 新英格兰 10 机 39 节点系统

Fig. 3 New England 10-machine 39-bus system

表 1 发电机额定参数

Table 1 Generator rated parameters

发电机编号	S_r /MVA	P /MW	H_i /s
G01	10 000	1 000	5.000
G02	700	567	4.329
G03	800	650	4.475
G04	800	632	3.575
G05	300	508	4.333
G06	800	650	4.350
G07	700	560	3.771
G08	700	540	3.471
G09	1 000	830	3.450
G10	1 000	250	4.200

3.2 最小一次调频容量验证

由式(9)、式(10)可以估算不同功率扰动下最小发电机组功频静态特性系数 K_{Gmin} ，见表 2。

表 2 最小功频静态特性系数估算

Table 2 Minimum power/frequency characteristic estimation

ΔP_0 /p.u.	K_{Gmin} /(MW Hz ⁻¹)	t_{max} /s
-0.15	19.762	2.71
-0.17	23.310	2.44
-0.20	27.933	2.16

将电网功频静态特性系数设置为所提方法求得的最小功频静态特性系数的 1.1 倍，可以得到不同功率扰动下的频率响应曲线，如图 4 所示。根据式(11)可计算相对应的系统最小一次调频容量，结果如图 5。可以看出，当系统惯性时间常数一定时，系统功率缺额增大，为维持频率稳定，应增大发电机组功频静态特性系数，提高机组一次调频容量。

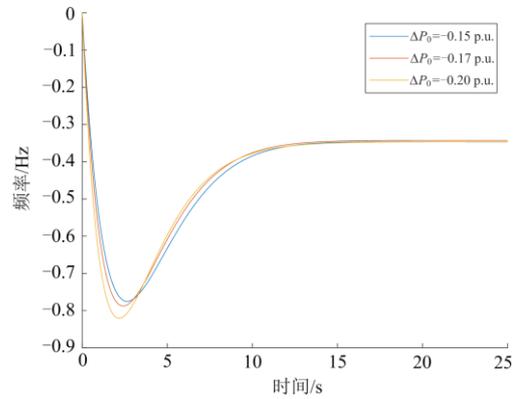


图 4 最小功频静态特性系数下的频率响应曲线

Fig. 4 Frequency response curve under minimum power/frequency characteristic

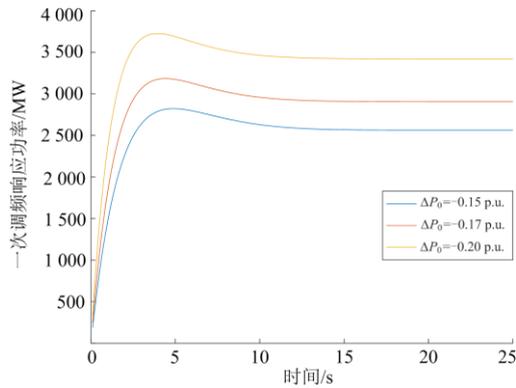


图 5 最小一次调频容量曲线

Fig. 5 Minimum primary frequency capacity curve

采用仿真得出的暂态频率偏差极值与系统允许最大频率偏差值的相对误差来评价模型计算结果的精度为

$$\varepsilon = \frac{\Delta f_{sim} - \Delta f_{max}}{\Delta f_{max}} \times 100\% \quad (15)$$

式中： Δf_{sim} 为仿真得到的暂态频率偏差极值； Δf_{max} 为系统允许的最大频率偏差值。

由表 3 可见，在不同功率扰动事件下，误差相对较小。因此，本文所提最小一次调频容量评估方法的有效性得到了验证。

表 3 最小一次调频容量评估误差

Table 3 Error analysis of minimum primary frequency capacity assessment

ΔP_0 /p.u.	Δf_{sim} /Hz	误差 ε /%
-0.15	-0.775	-3.1
-0.17	-0.788	-1.55
-0.20	-0.821	2.58

3.3 最小惯量响应验证

根据式(12)、式(13)可以估算不同功率扰动下系统最小惯性时间常数, 见表 4。

表 4 最小惯性时间常数估算

Table 4 Minimum inertia time constant estimation

$\Delta P_0/\text{p.u.}$	H_{\min}/s	t_{\max}/s
-0.15	4.325	2.59
-0.17	8.949	4.29
-0.20	19.472	7.33

将电网惯性时间常数设置为所提方法求得的最小惯性时间常数的 1.1 倍, 可以得到不同功率扰动下的频率响应曲线, 如图 6 所示。根据式(14)可计算相对应的系统最小惯量响应功率, 结果如图 7。当发电机组功频静态特性系数一定时, 系统功率缺额增大, 为维持频率稳定, 应增大系统惯性时间常数, 提高惯量支撑能力。

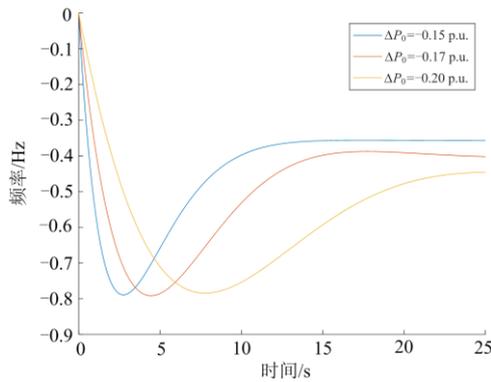


图 6 最小惯性时间常数下的频率响应曲线

Fig. 6 Frequency response curve under minimum inertia time constant

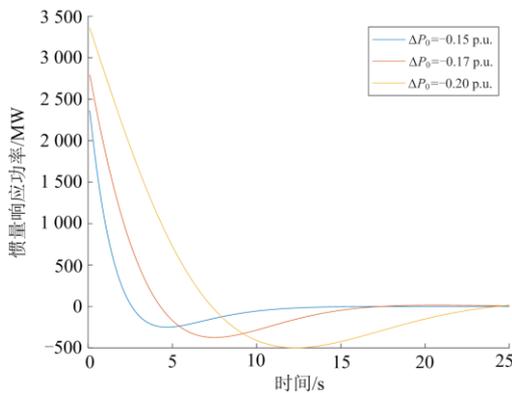


图 7 最小惯量响应功率曲线

Fig. 7 Minimum inertia response power curve

根据式(15)采用仿真得出的暂态频率偏差极值与系统允许最大频率偏差值的相对误差来评价模型

计算结果的精度。

由表 5 可见, 在不同功率扰动事件下, 误差相对较小。因此, 本文所提最小惯量评估方法的有效性得到了验证。

从以上仿真分析中可以看出, 对于较严重的功率扰动事件, 改善一次调频参数以保持频率稳定更为明显有效。因为惯量响应功率是一个短时的冲击型功率支撑, 主要作用于在扰动发生的初始阶段。该阶段由于调速器死区的存在, 一次调频出力基本为零, 由惯量响应功率弥补功率缺额, 阻止系统频率快速下跌, 进而为一次调频响应争取时间。由图 4 和图 6 可以看出, 对于相同大小的功率扰动, 过大的惯性时间常数还将使扰动初始阶段的频率变化率变小, 相同时间内的频率偏差减小, 进而影响机组一次调频的响应速度, 使得频率的暂态过程变长, 反而不利于系统频率稳定的恢复。因而在实际电力系统旋转动能逐渐变小的情况下, 优化一次调频控制来维持大功率扰动下系统频率稳定的解决方法更优。

表 5 最小惯量响应评估误差

Table 5 Error analysis of minimum inertia response assessment

$\Delta P_0/\text{p.u.}$	$\Delta f_{\text{sim}}/\text{Hz}$	误差 $\varepsilon/\%$
-0.15	-0.790	-1.31
-0.17	-0.792	-1.01
-0.20	-0.787	-1.578

4 结论

本文从电力系统频率稳定的角度出发, 探究了惯量响应和一次调频响应之间的关系, 在传统单机模型的基础上, 推导出了计及一次调频死区的频率响应时域表达式, 建立了系统最小惯量与一次调频容量评估模型, 主要结论如下:

1) 计算并绘制了惯量响应功率和一次调频响应功率曲线。通过公式直接计算电网最小惯量和一次调频容量, 降低了惯量评估误差对一次调频容量计算准确度的影响, 更加简单、准确、高效。

2) 最小功频静态特性系数和最小惯性时间常数的评估, 有助于合理控制新能源的接入规模, 提升电网新能源的渗透率, 优化虚拟惯量控制并制定合理的旋转备用方案。可根据估算结果设定功频静态特性系数和惯性指标警戒值, 用来监测系统惯量及一次调频情况, 避免由于电网惯量过低而使电网处于极限运行状态。

3) 惯量响应与一次调频响应间的相互作用不容忽视, 对于相同大小的功率扰动, 过大的惯性时间常数将影响系统一次调频的响应速度。且在新能源

源电力系统惯量不断降低的客观情况下, 优化一次调频参数维持系统频率稳定的方法更优。

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): 1-9. 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): 1-9.
- [2] 杜永安, 杜丽艳, 徐岩. 光伏发电接入柔直互联区域调频策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 1-9. DU Yong'an, DU Liyan, XU Yan. Frequency regulation for PV generation connected to an interconnection area by VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 1-9.
- [3] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904. ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.
- [4] 张永会, 鹿丽, 潘超, 等. 计及风-光-荷时序特性的主动配电网源-储规划策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 48-56. ZHANG Yonghui, LU Li, PAN Chao, et al. Planning strategies of source-storage considering wind-photovoltaic-load time characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 48-56.
- [5] OLUSOLA J O. The legal sustainability of energy substitution in Nigeria's electric power sector: renewable energy as alternative[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(4): 358-369. DOI: 10.1186/41601-020-00179-3.
- [6] TIELENS P, HERTEM D V. The relevance of inertia in power systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 999-1009.
- [7] ARANI Z D, NTAHER S A, GHASEMI A, et al. Application of multi-resonator notch frequency control for tracking the frequency in low inertia microgrids under distorted grid conditions[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 337-349.
- [8] 付红军, 陈惠粉, 赵华, 等. 高渗透率下风电的调频技术研究综述[J]. 中国电力, 2021, 54(1): 104-115. FU Hongjun, CHEN Huifen, ZHAO Hua, et al. Review on frequency regulation technology with high wind power penetration[J]. Electric Power, 2021, 54(1): 104-115.
- [9] 付媛, 王毅, 张祥宇, 等. 变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4706-4716. FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Analysis and integrated control of inertia and primary frequency regulation for variable speed wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4706-4716.
- [10] ZERTEK A, VERBIC G, PANTOS M. A novel strategy for variable-speed wind turbines' participation in primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 791-799.
- [11] 李少林, 王伟胜, 张兴, 等. 风力发电对系统频率影响及虚拟惯量综合控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 64-70. LI Shaolin, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Impact of wind power on power system frequency and combined virtual inertia control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 64-70.
- [12] 张刘杰, 肖仕武, 黄松柏. 基于灵敏度的孤网动态频率偏移峰值分析和调速系统参数优化[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 137-143. ZHANG Liujie, XIAO Shiwu, HUANG Songbai. Dynamic frequency offset peak analysis and speed control system parameter optimization of isolated network based on sensitivity[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 137-143.
- [13] NGUYEN N, MITRA J. An analysis of the effects and dependency of wind power penetration on system frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 354-363.
- [14] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991. LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [15] ASHTON P M, SAUNDERS C S, TAYLOR G A, et al. Inertia estimation of the GB power system using synchrophasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 701-709.
- [16] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2998-3007. WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2998-3007.
- [17] PEPICIELLO A, VACCARO A. An optimization-based method for estimating critical inertia in smart grids[C] // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 6-9, 2019, Bari, Italy: 2237-2241.
- [18] GOLPIRA H, SEIFI H, MESSINA A R, et al. Maximum penetration level of micro-grids in large-scale power systems: frequency stability viewpoint[J]. IEEE Transactions

- on Power Systems, 2016, 31(6): 5163-5171.
- [19] GU Huajie, YAN Ruifeng, SAHA T K. Minimum synchronous inertia requirement of renewable power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1533-1543.
- [20] 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.
- JIN Na, LIU Wenying, CAO Yinli, et al. Effect of primary frequency modulation parameters on the frequency characteristics of the large capacity generators[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 91-95.
- [21] DU P, MAKAROV Y. Using disturbance data to monitor primary frequency response for power system interconnections[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1431-1432.
- [22] BIAN Y, WYMAN-PAIN H, LI F. Demand side contributions for system inertia in the GB power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3521-3530.
- [23] 秦毅, 刘国海. 基于惯量响应支撑功率的电力系统一次调频功率估算[J/OL]. 电测与仪表: 1-6[2021-02-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200826.1451.014.html>.
- QIN Yi, LIU Guohai. Primary frequency power estimation of power system based on inertia response support power[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-6[2021-02-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200826.1451.014.html>.
- [24] 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.
- [25] EGIDO I, FERNANDEZ-BERNAL F, CENTENO P, et al. Maximum frequency deviation calculation in small isolated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(4): 1731-1738.
- [26] 刘柳, 李卫东, 唱友义, 等. 大功率缺失下频率最低点估计的低阶仿真模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 78-83.
- LIU Liu, LI Weidong, CHANG Youyi, et al. Low-order simulation model for frequency nadir estimation with high power deficit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 78-83.
- [27] 李中伟, 白子扬, 周伟健, 等. 电热水器负荷参与电力系统调频响应过程分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 183-189.
- LI Zhongwei, BAI Ziyang, ZHOU Weijian, et al. Analysis process of electric water heater load involved in power system frequency modulation response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 183-189.
- [28] WANG Z H, WANG J X, LI G Y, et al. Generation-expansion planning with linearized primary frequency response constraints[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(4): 346-354.
- [29] 丁立, 乔颖, 鲁宗相, 等. 高比例风电对电力系统调频指标影响的定量分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 1-8.
- DING Li, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Impact on frequency regulation of power system from wind power with high penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 1-8.
- [30] 赵渊, 吴小平, 谢开贵. 基于频率动态特性的电力系统频率失稳概率评估[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 212-220.
- ZHAO Yuan, WU Xiaoping, XIE Kaigui. Probabilistic assessment for frequency instability of power system based on frequency dynamic characteristic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 212-220.
- [31] 马智慧, 李欣然, 谭庄熙, 等. 考虑储能调频死区的一次调频控制方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2102-2115.
- MA Zhihui, LI Xinran, TAN Zhuangxi, et al. Integrated control of primary frequency regulation considering dead band of energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2102-2115.
- [32] 范成围. 计及调速器非线性的电力系统动态频率特征预测[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- FAN Chengwei. Characteristic prediction of power system dynamic frequency considering governor nonlinearity[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [33] 李常刚, 张恒旭, 刘玉田, 等. 考虑机组低频保护的电力系统暂态频率稳定评估[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 271-278.
- LI Changgang, ZHANG Hengxu, LIU Yutian, et al. Power system transient frequency stability assessment considering unit underfrequency relay protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 271-278.

收稿日期: 2021-03-08; 修回日期: 2021-05-10

作者简介:

李东东(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析、新能源并网和智能用电。E-mail: upwgrp@163.com

(编辑 周金梅)