

基于密切值法的机组一次调频性能综合评价

机组一次调频性能对电网的安全运行具有重要影响。根据机组一次调频性能指标的重要程度,构建了包括机组一次调频响应滞后时间、一次调频稳定时间、一次调频效果、一次调频最大负荷调整幅度和调差能力等的机组一次调频性能评价指标体系,并提出了基于密切值法的机组一次调频性能综合评价方法。利用某地区多台机组的WAMS实测一次调频数据,对基于密切值法的一次调频性能综合评价方法进行了验证,结果表明所提机组一次调频性能综合评价方法是有效的。

潘 轩¹ 张 岩² 范新桥³ 沙立成¹ 韩 军⁴/1.国网北京市电力公司
2.国网北京电力科学研究院 3.北京信息科技大学自动化学院 4.国网新疆电力公司疆南供电公司

0 引言

电力系统频率是电力系统安全稳定运行的最重要参数之一。当系统有功发生不平衡时,电网频率将发生变化。频率越过机组一次调频动作死区后,在可调容量裕度允许的情况下,一次调频功能会通过自动调整机组出力来使有功功率达到新的平衡。而如果机组一次调频性能达不到要求或异常,则可能给电网安全运行埋下重大隐患。为保证电网安全运行,有必要对发电机组的一次调频性能进行综合评价分析,促进其性能达到相关技术标准的要求。

机组一次调频性能的传统测试方法是使用离线频差阶跃信号来模拟电网频率扰动,进而验证扰动作用下机组一次调频性能。然而,对于实际运行的电网,其频率是连续变化的,传统离线试验测试方法无法全面模拟所有实际的频率扰动,因而难以反映机组的各种在线运行状态^[1],所以一次调频离线检测方法

具有不全面性。近年来,机组一次调频性能评价研究也取得了一定效果。文献[2]提出了电网的一次调频能力评价指标及其估计计算方法。文献[3]以一次调频贡献电量为主要评价指标来考核机组的一次调频能力。文献[4]以PMU数据为基础,根据调差系数计算值和实际处理调整量评估机组一次调频性能。此外,在机组的一次调频过程中常常伴随自动发电控制(AGC)回路的影响,文献[5]通过在机组功率变化中减去AGC指令的变化来剔除大部分的影响,并且提出了动态调速不等率及其相应延时指标,以衡量机组的快速支援能力等。

机组一次调频性能在线监测评价的关键在于动态数据采集、合适指标的选取以及其性能参数的在线分析评价。随着广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)技术的逐渐成熟及在实际工程中的普遍应用,WAMS已经成为电力系统调度自动化必要的组成部分。WAMS在智能电网调度控制系统(D5000系统)中的集成实现了国、网和省三级调度中心之间动态数据信息的互通互联^[6-7],WAMS在线监测数据为机组一次调频性能评价提供了数据基础^[8]。基于动态在线监测数据对机组一次调频性能进行在线评价,对于保障机组良好的一次调频能力具有重要意义。

评价指标合适与否对于正确和全面客观反映机组一次调频综合性能有一定影响。此外,在机组一次调频单项性能指标评价的基础上,进一步对一次调频综合性能进行评价,实现不同机组一次



潘 轩/工程师

关键词/Keywords

机组一次调频·
性能指标·
综合评价·
密切值法·

调频性能的综合评价比较,对甄别其一次调频性能优劣具有实际意义。密切值法是一种决策过程简明客观、决策结果直观的多目标优化决策的优选法,它适用于多指标的综合评价,且该方法已在电力系统评估等领域得到一定应用^[9],并取得了一定效果。本文将构建机组一次调频性能指标体系,并基于WAMS的机组一次调频性能监测数据对一定时间段内机组一次调频性能指标进行在线计算,进而采用密切值法计算综合指标实现一次调频综合性能评价,最后对所提基于密切值法的一次调频性能综合评价方法进行验证。

1 一次调频性能指标体系

1.1 一次调频响应滞后时间和稳定时间指标

机组一次调频响应滞后时间是从电网频率变化达到一次调频动作值到机组出力开始向频率恢复方向变化所需的时间,一般应小于3 s。假定电网频率在 T_0 时刻越过一次调频动作死区,调节级压力随之变化,此时可通过监测机组功率变化分析出调节级压力(机组功率)作出响应的拐点时刻 T_1 ,即机组出力实际动作时刻。那么,机组一次调频响应滞后时间 Δt 可采用两者之差计算得出。

机组参与一次调频过程中,当电网频率稳定后,机组出力达到稳定所需的时间为一次调频的稳定时间,一般应小于1 min。如图1所示,利用机组出力趋于稳定的拐点时刻 T_2 与电网频率越过一次调频动作死区时刻 T_0 之差,即可得到机组一次调频稳定时间 t_1 。

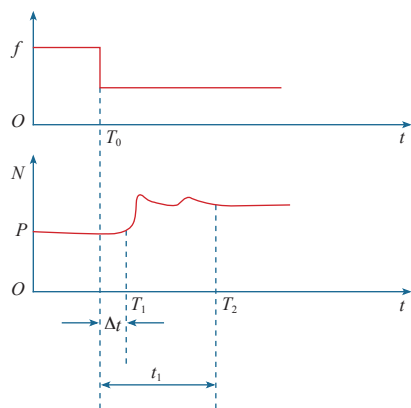


图1 一次调频响应滞后时间和稳定时间示意图

机组一次调频响应滞后时间越短,说明机组对于频率变化的反应越快;稳定时间越短,则表征机组的一次调频调节速度越快,且当机组投入自动发电控制(AGC)运行时,最好能剔除负荷指令因素的影响。

一次调频响应滞后时间和稳定时间反映了功率调节的滞后特性,该指标可以根据一段时间内的一次调频越限事件下的合格情况进行定义,即

$$OT_1 = A / B \quad (1)$$

$$OT_2 = C / B \quad (2)$$

式中, OT_1 为机组一次调频响应滞后时间合格率; A 为机组一次调频响应滞后时间小于3 s的次数; B 为一次调频动作事件次数; OT_2 为机组一次调频稳定时间合格率; C 为机组一次调频稳定时间小于1 min的次数。

1.2 机组一次调频效果指标

一次调频效果指当电网频率超出 $50 \pm \Delta f_{sq}$ (机组频率控制死区)且持续时间超过20 s时,一次调频机组在电网频率超出 $50 \pm \Delta f_{sq}$ 时段内(最大为60 s)的实测贡献电量与理论贡献电量的比值。一次调频效果DX可采用下式进行计算

$$DX = \frac{H_i}{H_e} \quad (3)$$

式中, H_i 和 H_e 分别为机组一次调频实测贡献电量和理论贡献电量。

$DX > 0$ 时,表示一次调频动作方向正确; $DX < 0$ 时,则表示方向错误,即机组出力的变化方向加剧了频率的越限状态,对频率恢复起反作用; $DX = 0$ 时,表示一次调频不起作用,计算时一般当 $DX < 0$ 时自动将期置为0,表示一次调频方向错误。

(1) 一次调频实测贡献电量计算

机组一次调频实测贡献电量 H'_i 是指在电网频率越过机组一次调频死区的一个积分期间的电量。以越过机组一次调频死区时的实际发电有功 P_0 为基点,对功率变化量进行积分,积分长度为1~2 min。如果机组在1~2 min且系统频率恢复到动作死区以内,则积分时间到该时刻止。具体计

算如下式所示

$$H'_i = kH_i = k \int_{t_0}^{t_i} (P_t - P_0) dt \quad (4)$$

式中, t_0 和 t_i 分别为系统频率超过和返回机组一次调频动作死区所对应的时刻; P_t 和 P_0 分别为 t 和 t_0 时刻机组实际有功出力; H'_i 的符号用 k 来表示, 以高频少发或低频多发发电量为正, 高频多发或低频少发电量为负, k 取不同的值来区分这四种不同的情况, 具体约定如表1所示。

表1 频率越限状态分类

频率越限状态	H_i	调节效果	k	H'_i
$>(50 + \Delta f_{eq})$	<0	正常	-1	>0
$>(50 - \Delta f_{eq})$	>0	异常	-1	<0
$<(50 - \Delta f_{eq})$	<0	异常	1	<0
$<(50 + \Delta f_{eq})$	>0	正常	1	>0

即积分电量为正, 则表示机组出力促进频率的恢复; 当积分电量为负, 则表示机组出力变化方向对频率恢复起反作用。

(2) 一次调频理论贡献电量计算

机组一次调频理论贡献电量 H_c 计算式为

$$H_c = \int_{t_0}^{t_i} \Delta P(\Delta f, t) dt \quad (5)$$

其中

$$\Delta P(\Delta f, t) = \Delta f(t) \times \text{MCR} / (f_n \times K_c) \quad (6)$$

式中, $\Delta f(t) = |f_t - 50| - f_{\text{人工死区}}$ 为电网频率变化超过死区的频率差绝对值; MCR为机组额定有功出力; f_n 为电网额定频率50 Hz; f_t 为对应 t 时刻的频率; K_c 为机组速度变动率。

1.3 最大负荷调整幅度合格指标

一次调频的最大负荷调整幅度是指运行机组从电网频率越过该机组一次调频死区时刻开始计时的60 s以内, 或者到电网频率恢复到该机组的一次调频死区范围内的时刻为止, 该机组有功出力进行相应调整的最大幅度^[10]。

设置机组的最大负荷限幅可保证系统频率变化较大时不会造成机组出力剧增而导致主燃料跳闸(MFT)动作, 而设置过小则会使一次调频能力较弱。火电机组一般根据容量不同设置不同的限幅, 而水电机组一般没有限幅。

在最大负荷调整幅度合格情况下, OV可定义

为一段时间内一次调频负荷调整幅度未超过最大允许幅度的次数与一次调频动作次数之比, 即

$$\text{OV} = E / F \quad (7)$$

式中, E 为机组一次调频负荷调整幅度未超过最大允许幅度的次数; F 为一次调频动作次数。

1.4 调差系数指标

在调速系统静态特性曲线上, 一次调频表现为负荷点在静态特性曲线上移动, 通常可近似将该曲线视为一条直线, 该直线斜率的倒数即为调差系数。调差系数较小时, 机组的调频能力较强, 但调频机组自身的稳定性变差; 调差系数较大时, 有利于调频机组自身的稳定, 但不利于电网应对突发扰动或事故时的频率稳定。

机组调差系数 δ 的计算式为

$$\delta = -\frac{\Delta f / f_N}{\Delta P / P_N} \times 100\% \quad (8)$$

式中, Δf 为频率变化量; f_N 为额定频率; ΔP 为机组出力变化量; P_N 为机组额定有功出力。

实际中, 调差系数可根据调节前后的频率、有功功率的稳态值计算得出, 其反映的是机组一次调频有差调节特性, 主要用于衡量一次调频静态特性。

2 基于密切值法的一次调频性能评价

2.1 样本指标矩阵的建立

假设有 n 台发电机组, 分别用 $z_1, z_2, z_3, \dots, z_n$ 表示。各机组一次调频性能指标数均为 m , 分别为 $s_1, s_2, \dots, s_m$ 。若机组 z_i 在指标 s_j 下的取值用 c_{ij} 表示, 则由 n 个待评价机组的 m 个评价指标值构成样本指标初始矩阵为 Y , 即

$$Y = (c_{ij})_{n \times m} \quad (9)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ 。

2.2 样本指标矩阵规范化处理

对于一次调频性能指标, 可将其分为正向指标(指标值越大越好)和逆向指标(指标值越小越好)。一次调频响应滞后时间和稳定时间合格情况、效果指标以及最大负荷调整幅度合格情况指标均为正向指标, 调差系数指标为负向指标。

先对初始样本矩阵进行规范化处理,即将逆向指标化为正向指标,再进行归一化处理。规范化处理后的指标用 r 表示。

对于正向指标

$$r_{ij} = \frac{c_{ij}}{\left(\sum_{i=1}^n c_{ij}^2 \right)^{0.5}} \quad (10)$$

对于逆向指标

$$r_{ij} = \frac{-c_{ij}}{\left(\sum_{i=1}^n c_{ij}^2 \right)^{0.5}} \quad (11)$$

经过归一化处理后,得到式(12)所示的规范化样本指标矩阵。其中, $i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,m$ 。

$$Z = (r_{ij})_{n \times m} \quad (12)$$

考虑到各指标重要程度不同,可通过专家知识确定各指标的权重 w 。确定指标权重后,利用下式可计算得到加权数据矩阵 Z' 为

$$Z' = Z \times w = (r'_{ij})_{n \times m} \quad (13)$$

2.3 评价指标虚拟最优、最差点计算

令 r_j^+ 和 r_j^- 分别为虚拟最优点和虚拟最差点,其中 $j=1,2,\dots,m$,则

$$\begin{aligned} r_j^+ &= \max_{1 \leq i \leq n} \{r'_{ij}\} \\ r_j^- &= \min_{1 \leq i \leq n} \{r'_{ij}\} \end{aligned} \quad (14)$$

虚拟最优点和虚拟最缺点的集合 A^+ 和 A^- 分别由各归一化指标的最大值和最小值组成,即

$$\begin{aligned} A^+ &= (r_1^+, r_2^+, \dots, r_m^+) \\ A^- &= (r_1^-, r_2^-, \dots, r_m^-) \end{aligned} \quad (15)$$

2.4 各样本点的密切值计算

根据欧式空间距离的计算方法计算各样本点与最优点、最缺点的欧式距离 d_i^+ 、 d_i^- ,即

$$d_i^+ = \left[\sum_{j=1}^m (r'_{ij} - r_j^+)^2 \right]^{0.5} \quad (16)$$

$$d_i^- = \left[\sum_{j=1}^m (r'_{ij} - r_j^-)^2 \right]^{0.5}$$

令 $d^+ = \min_{1 \leq i \leq n} \{d_i^+\}$, $d^- = \max_{1 \leq i \leq n} \{d_i^-\}$, 则第 i 个被评

价机组的密切值 E_i 为

$$E_i = \frac{d_i^+}{d^+} - \frac{d_i^-}{d^-} \quad i=1,2,\dots,n \quad (17)$$

通过比较计算所得被评价机组 E_i 值的大小,可以得到不同机组一次调频综合性能的排序。

3 实例验证

为验证所提基于密切值法的一次调频性能综合评价方法,本文选用某地区4台机组一个月内的WAMS实测数据进行指标计算。如图2所示,列出了某机组的其中一次频率越调速器死区下的机组出力及频率曲线。

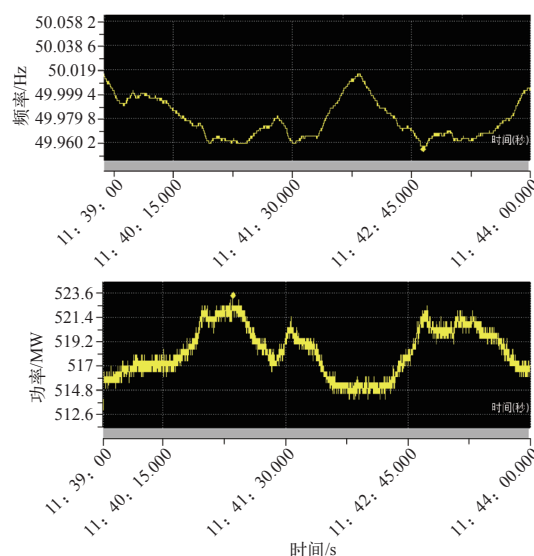


图2 机组出力变化曲线

频率越调速器死区(一般为0.033 Hz)后,机组一次调频动作,机组出力开始变化,根据前述指标计算方法即可计算出相应的一次调频性能指标。各指标的计算结果如表2所示。

表2 机组一次调频性能指标计算结果

机组	Ind _{lag}	Ind _{sta}	Ind _{eff}	Ind _{amp}	Ind _{kd}
机组1	0.96	0.98	0.9	0.96	0.03
机组2	0.95	0.89	0.85	0.89	0.04
机组3	0.92	0.92	0.79	0.89	0.05
机组4	0.95	0.91	0.91	0.93	0.03

其中, Ind_{lag}为一次调频响应滞后时间合格指标; Ind_{sta}为稳定时间合格指标; Ind_{eff}为一次调频效果指标; Ind_{amp}为一次调频最大负荷调整幅度合格指标; Ind_{kd}为调差系数或调频能力指标。

根据专家知识确定各指标的权重 w 为

$$w\{\text{Ind}_{\text{lag}}, \text{Ind}_{\text{sta}}, \text{Ind}_{\text{eff}}, \text{Ind}_{\text{amp}}, \text{Ind}_{\text{kd}}\} \\ = \{0.1, 0.1, 0.5, 0.1, 0.2\} \quad (18)$$

根据前述基于密切值法的一次调频性能评价指标计算方法可得各机组密切值 E_i ，如表3所示。

表3 机组一次调频性能综合评价排序

机组	d_i^+	d_i^-	E_i	综合性能排序
机组1	0.052 2	0.032 5	1.010 9	1
机组4	0.052 2	0.034 9	0.968 5	2
机组2	0.031 9	0.031 3	0.398 5	3
机组3	0.035 2	0.052 1	0.101 8	4

由评价结果可以看出，机组1的一次调频综合性能最好，机组4次之，机组2优于机组3。

根据表2可以看出，机组1的一次调频响应滞后时间合格指标为0.96，稳定时间合格指标为0.98，一次调频效果指标为0.90，最大负荷调整幅度为0.96，调差系数指标为0.03，其中调差系数指标为负指标，其值越小越优，其他4个指标为正指标，其值越大越优。因此，从结果看机组1的正指标值较其他机组均较大或相差很小，而负指标值小于或等于其余机组，故机组1的一次调频性能应最优。对于机组4，相比其他两台机组其各性能指标仅次于机组1。机组3的负指标值最大，而正指标值普遍小于其余机组的正指标值，尤其对于重要程度较高的一次调频效果指标值相对最小，所以机组3的一次调频性能应相对最差。对于机组2，其一次调频各性能指标值基本介于机组4和机组3之间。因此，通过对比分析结果和机组一次调频性能评价计算结果可知，分析结果和表3中励磁系统性能综合评价结果一致。

此外，本文还选用了其他多台实际机组的一次调频监测数据进行了大量测试。测试结果表明，所提机组一次调频性能综合评价方法可实现对机组一次调频性能的有效综合评价。

4 结束语

根据机组一次调频性能指标的重要程度，构建了包括机组一次调频响应滞后时间、一次调频稳定时间、一次调频效果、一次调频最大负荷

调整幅度和调差能力等的机组一次调频性能评价指标体系。提出了基于密切值法的机组一次调频性能综合评价方法，利用机组一次调频性能实测数据计算得到各机组一次调频的密切值指标，该指标可准确客观地表征出机组一次调频的综合性能。最后，利用某地区一段时间内多台机组一次调频实测WAMS数据对所提一次调频性能综合评价方法进行了验证分析，结果表明基于密切值法的机组一次调频性能综合评价方法是有效的。

参考文献

- [1] 马鸿杰, 苏凡, 沈丛奇, 等. 发电机组一次调频性能在线测试功能的开发与实施 [J]. 华东电力, 2012, 40 (8): 1420-1423.
- [2] 于达仁, 郭钰锋. 电网一次调频能力的在线估计 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (3): 72-76.
- [3] 李端超, 陈实, 陈中元, 等. 发电机组一次调频调节效能实时测定及补偿方法 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (2): 70-72.
- [4] 郑涛, 高伏英. 基于PMU的机组一次调频特性参数在线监测 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (11): 57-61, 71.
- [5] 高林, 戴义平, 王江峰, 等. 机组一次调频参数指标在线估计方法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (16): 62-69.
- [6] 韩松, 何利铨, 邱国跃. WAMS研究、建设与应用的新进展 [J]. 电测与仪表, 2011 (4): 1-8.
- [7] 段刚, 严亚勤, 谢晓冬, 等. 广域相量测量技术发展现状与展望 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (1): 73-80.
- [8] 罗建裕, 王小英, 鲁庭瑞, 等. 基于广域测量技术的电网实时动态监测系统应用 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (24): 78-80.
- [9] 黄静, 马宏忠, 纪卉. 密切值法在电能质量综合评价中的应用 [J]. 继电器, 2008, 36 (3): 60-63, 70.
- [10] 程远楚, 陈婉, 杨为城, 等. 水电机组一次调频性能评价探讨 [J]. 水电自动化与大坝监测, 2011, 35 (6): 23-26, 43.

(收稿日期: 2015-12-12) EA