142

一种可用于监测调速系统对低频振荡影响的方法

李 勇1,刘子全2,奚江惠1,党 杰1,姚 伟2,文劲宇2

(1. 国家电网华中电力调控分中心,湖北 武汉 430077;

2. 华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要:受制于机械功率难以测量的实际情况,调速系统对低频振荡影响的在线分析较为困难。通过转矩分析 分别研究了在不考虑和考虑调速2种情况下转速偏差、电磁功率偏差与机械功率偏差在功角-转速平面上的 关系,发现:若调速系统提供了负阻尼转矩,则电磁功率偏差与转速偏差的夹角 θ_2 将小于 $\pi/2$ 与低频振荡阻尼 比 $\xi 之 \hat{z}$;若调速系统提供了正阻尼转矩,则 θ_2 将大于 $\pi/2-\xi_0$ 基于上述分析结果,提出一种基于监测量 在线判断调速系统对低频振荡影响的方法。该方法通过在线辨识 ξ 和监测 θ_2 来判断 θ_2 与 $\pi/2-\xi$ 的大小关 系,即可确定调速系统是否对低频振荡提供负阻尼。4 机 2 区域系统和某实际互联电力系统的仿真结果表 明,在判断调速系统为低频振荡提供负阻尼后,通过使调速器进入开环控制模式能够有效提升振荡阻尼比, 从而验证了所提方法的有效性和实用性。

关键词:原动机调速系统;低频振荡;监测;转矩分析;阻尼

中图分类号: TM 862 文献标识码: A

0 引言

弱阻尼低频振荡仍然是制约互联电力系统功率 传输和威胁其安全稳定运行的主要因素之一^[1-2]。在 以往研究低频振荡的过程中,调速系统因其响应速度 较慢而常常被忽略^[3]。然而随着现代调速器技术的 不断进步和发展,其响应速度有了极大的提高^[4-5], 可能影响到低频振荡的阻尼,因而应当在低频振荡 分析中加以考虑。另一方面,近年来的一些低频振荡 事件的事后分析也发现,调速系统引起的低频振荡已 占有一定的比重。文献[1]给出了南方电网 2008 年 至 2012 年的功率振荡事件汇总,其中统计的 15 次 振荡事件中,有 6 次振荡是由调速系统不稳定或缺 陷引起,还有 2 次是由一次调频不稳定引起。上述 情况表明,应当重视调速系统对低频振荡的影响。

目前,低频振荡的分析与控制仍然是电网稳定 研究的热点^[6-7]。并且,国内外对调速系统对低频振 荡的影响已经开展了一些研究^[8-20]。文献[8-11]分 别从原动机调速系统的模型、参数、功率的反馈方 式和流量特性等方面分析了其对电力系统低频振荡 阻尼的影响。文献[12]和文献[13]分别指出阀门调 节的扰动和汽轮机压力脉动可能引起系统发生共振 型功率振荡。文献[14]给出了汽轮机阀门切换操作 不当引发振荡的实例。文献[15]对阀门控制方式切 换引发低频振荡进行了机理分析。还有一些文献涉 及调速在低频振荡中的控制等^[16-19]。这些研究结果

收稿日期:2015-03-21;修回日期:2015-11-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177057)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177057) DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.03.022

进一步表明,原动机调速系统对于低频振荡的影响 不容忽略。然而,现有分析多是事后分析,主要根据 事后搜集的资料,通过建模校验和计算判断调速系 统是否引起了系统低频振荡^[5]。这样虽然能为电力 系统稳定运行积累经验,但对于现场控制缺乏指导 意义。因此,寻找一种能够在线监测判断调速系统 对低频振荡影响的方法,将为实现电网低频振荡的 原因快速判断和稳定控制提供理论支持,具有一定的 实际意义。目前,调速器本身各个元件的故障已有相 关故障诊断方法的研究^[20],而在其作为整体影响低 频振荡阻尼方面的监测与判断方法研究还较少。

本文针对调速系统整体可能向低频振荡提供负 阻尼转矩这一方面,结合调速系统在影响低频振荡 阻尼时会造成监测量的关系发生改变这一现象,从 监测的角度进行分析,判断调速系统对系统低频振 荡阻尼的影响。本文首先分析了调速系统在引起低 频振荡阻尼变化时功率与功角、转速变量的关系变 化,并提出了一种监测调速系统对低频振荡影响的 实用方法,最后分别通过4机2区域系统和某实际 互联电力系统验证了所提方法的有效性和实用性。

1 振荡时各监测量之间的关系

以单机无穷大系统为例,考虑电力系统稳定器 PSS(Power System Stabilizer)作用的 Phillips-Heffron 模型^[3]如图 1 所示。图中,参数 $K_1 - K_6$ 的定义见文 献[3]; $\Delta P_m, \Delta P_e, \Delta \omega, \Delta \delta$ 分别表示机械功率偏差、电 磁功率偏差、转速偏差、功角偏差; ω_0, T'_{d0}, T_J 分别表 示同步转速、d轴暂态时间常数、发电机转子惯性时 间常数。



图 1 单机无穷大系统的 Philips-Heffron 模型 Fig.1 Philips-Heffron model of single-machine infinite-bus system

1.1 忽略调速系统影响时的转矩分析

忽略原动机调速系统的影响时,即 ΔP_m=0,此时 一台发电机转子方程可以表述为:

$$\begin{cases} T_{\rm J} \frac{\mathrm{d}\Delta\omega}{\mathrm{d}t} = -\Delta P_{\rm e} \\ \frac{\mathrm{d}\Delta\delta}{\mathrm{d}t} = \omega_0 \Delta\omega \end{cases} \tag{1}$$

根据转矩理论,该式又可化为如下形式[6]:

$$s^{2}\Delta\delta + K_{\rm D}s\Delta\delta + K_{\rm S}\Delta\delta = 0 \tag{2}$$

其中,K_D为阻尼转矩系数;K_s为同步转矩系数。式 (2)即为发电机振荡二阶特征方程。

对于一个振荡而言,其特征方程又可以写为:

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \tag{3}$$

其中, ξ 为阻尼比; ω_n 为自然振荡角频率。其解为 $\lambda_{1,2}$ = $\alpha \pm j\omega_d, \alpha$ 为特征值实部, ω_d 为振荡频率。则有:

$$\alpha = -\xi \omega_n, \ \omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$
 (4)
由特征方程的解,得到 $\Delta \delta$ 的通解为:

$$\Delta \delta = C_1 \mathrm{e}^{\lambda_1 t} + C_2 \mathrm{e}^{\lambda_2 t} \tag{5}$$

其中, C_1 、 C_2 由 $\Delta \omega$ 、 $\Delta \delta$ 初值决定,为一共轭复数,影 响特解的幅值和初始相位。不过,由于这里关注的 是 $\Delta \omega$ 、 $\Delta \delta$ 、 ΔP_e 的相对相位关系,并不受幅值和初始 相位的影响,因此为了简单起见,假定 $C_1 = C_2 = 1$,则 由欧拉公式,可得 $\Delta \delta = 2e^{\alpha t} \cos(\omega_d t)$ 。那么得:

$$\Delta \omega = \Delta \delta = 2 \mathrm{e}^{\alpha t} \omega_{\mathrm{n}} \sin(\omega_{\mathrm{d}} t - \theta) \tag{6}$$

$$\theta = \arcsin(\alpha/\omega_n) = \arcsin(-\xi)$$
 (7)

对于能够威胁到电网安全稳定的低频振荡而言, 其阻尼比 ξ 通常较低,一般在 0.05 以下,不可能超过 0.1,此范围内,在弧度制下将有 $\theta \approx -\xi$,则有:

$$\Delta \omega = 2 \mathrm{e}^{\alpha t} \omega_{\mathrm{n}} \cos\left(\omega_{\mathrm{d}} t + \pi/2 + \xi\right) \tag{8}$$

可以看到, $\Delta \omega$ 超前 $\Delta \delta$ 弧度为 $\pi/2+\xi$,同理可 知, $-\Delta P_e$ 超前 $\Delta \omega$ 弧度同样为 $\pi/2+\xi$,那么 ΔP_e 滞后 $\Delta \omega$ 的弧度为 $\pi/2-\xi$ 。

在实际仿真计算中,以 $\Delta\delta$ 为基准, $\Delta\omega$ 、 $\Delta\delta$ 、 ΔP_e 的相对相位关系如图2所示。不过,这一相位关系 在原动机调速系统加入后有所变化。



图 2 不计原动机调速系统时 $\Delta P_e 与 \Delta \omega$ 实际关系

Fig.2 Relationship between $\Delta P_{\rm e}$ and $\Delta \omega$ without turbine and governor system

1.2 考虑调速系统影响时的转矩分析

接下来考虑含调速系统时各个变量的相位关系。考虑原动机调速器的发电机转子方程以及机械 功率表达式可以写成如下形式(忽略自然阻尼 D):

$$T_{\rm J} \frac{\mathrm{d}\Delta\omega}{\mathrm{d}t} = \Delta T_{\rm m} - \Delta T_{\rm e} \approx \Delta P_{\rm m} - \Delta P_{\rm e}$$

$$\frac{\mathrm{d}\Delta\delta}{\mathrm{d}t} = \omega_0 \Delta\omega$$
(9)

从式(1)和转矩分析中可知, $-\Delta P_{\rm m}$ 对转矩的影响与 $\Delta P_{\rm e}$ 的效果相同, 即 $-\Delta P_{\rm m}$ 落在 $\Delta P_{\rm e}$ 提供正阻尼的象限, 将向系统提供正阻尼, 依此类推。

对于闭环运行的一次调频而言,如果原动机调 速系统参与了低频振荡(可以通过 DEH 阀位指令动 作情况判断),则 $\Delta P_e - \Delta P_m$ 将代替前述 ΔP_e ,与 $\Delta \delta$ 、 $\Delta \omega$ 成一定的夹角关系。即 $\Delta P_m - \Delta P_e$ 超前 $\Delta \omega$ 弧度 为 $\pi/2 + \xi$, $\Delta P_e - \Delta P_m$ 滞后 $\Delta \omega$ 的弧度为 $\pi/2 - \xi$ 。

那么,考虑原动机调速系统作用后,振荡情况下 的转矩位置可能有如图 3 所示的 4 种情况,其中既 有提供正阻尼的情况,也有提供负阻尼的情况。那 么,在电网低频振荡时,及时判断调速系统有没有参 与电网低频振荡以及对低频振荡提供正的还是负的 阻尼就显得尤为重要。

虽然原本从转矩分析上看,通过机械功率增量与 转速偏差的相位关系就可以确定原动机调速对振荡 提供正的还是负的阻尼,但是机械功率增量往往难 以测量。因此,从监测的角度出发,使用的监测量可 以为 ΔP_e 和 $\Delta \omega$ 。可以清晰地看到,较之不考虑原动 机调速系统的情况,考虑原动机调速后,受 ΔP_m 影响, ΔP_e 与 $\Delta \omega$ 的夹角发生了变化,这一变化可以有效地 指示 ΔP_m 所处的位置,因此可以用来判断机械转矩对 振荡的影响。因而图 3 中所示关系就得到了运用。

假定不计调速并根据阻尼比推算得到的为 θ_1 , 测量得到 ΔP_e 与 $\Delta \omega$ 夹角为 θ_2 ,对比图2和图3可知:

a. 对于阻尼比不高的低频振荡而言,调速器不 动作时, ΔP_e 与 $\Delta \omega$ 夹角 θ_1 约为 $\pi/2-\xi$;

b. 如果调速器动作参与振荡,并且向振荡提供 负阻尼,则 ΔP_e 与 $\Delta \omega$ 夹角弧度 θ_2 应当小于 θ_1 ;

c. 如果调速器动作参与振荡,并且向振荡提供



(d) ΔPm 在第三象限提供正阻尼

图 3 不同情况下相位平面内机械转矩位置示意图 Fig.3 Position of mechanical torque on phase plane for different situations

正阻尼,则 ΔP_e 与 $\Delta \omega$ 夹角 θ_2 应当大于 θ_{10}

2 调速对低频振荡影响的在线辨别方法

上述3条结论是判断调速系统对振荡影响的主要判据。由于振荡过程中,这些监测量往往包含其他模式或直流分量,因此在进行相位关系判断时,需要通过滤波器滤去这些分量再进行计算。

判断相位差的方式有很多,本文采取较为简单 的过零点判断,即通过检测 $\Delta \omega$ 的某一过零点在其 相邻的 ΔP_e 2 个过零点之间的位置,判断两者相位 关系。需要说明的是,这种方式在判断单一模式时 较为简单可靠,并且也是基于系统中阻尼较弱的区 域间模式通常比较固定^[21]来进行的。如果发电机同 时参与 2 个频率和阻尼比都很接近的模式,则必须 要采用波形辨识算法进行拆分后再进行判断^[22]。 另外,文献[23]表明,目前转速测量和功率测量已经 能够达到较好的精度,文献[24]已经使用这些量进 行扰动源定位,这些工作能够为下述方法的实现提 供一定支持。总体形成的流程如图4所示。其中,采 用 TLS-ESPRIT 方法辨识振荡阻尼比^[25](TLS 为总体 最小二乘法,ESPRIT 算法即基于旋转不变技术的 信号参数估计法(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques))。



图 4 判断调速对低频振荡影响的流程 Fig.4 Flowchart of identifying influence of governor on LFO

开始时,首先需要监测机端功率,通过发电机的 振荡告警功能判断发电机是否发生了振荡^[26]。确定 机组发生振荡后,对 $\Delta P_e, \Delta \omega$ 量进行滤波,去除噪声 以及直流分量,对于频率单一的振荡而言,直接通过 TLS-ESPRIT 方法辨识振荡的阻尼比 ξ 。得到 ξ 以 后,就能够计算得到 $\theta_1 = \pi/2 - \xi$ 。如图 5 所示,通过 过零点位置计算 θ_2 ,取 2 个相邻的有功功率增量过



图 5 ΔP_e 与 $\Delta \omega$ 相位差关系示意图 Fig.5 Schematic diagram of phase difference between ΔP_e and $\Delta \omega$

零点,对应时间分别为 t₁、t₂(t₂>t₁),取这 2 个过零点 间的转速增量过零点 t₃,那么可得:

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \left(t_3 - \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \pi / (t_2 - t_1) \tag{10}$$

对比 θ_1 和 θ_2 ,当 $\theta_1 > \theta_2$ 时,判断调速系统对振荡 提供了负阻尼,可以考虑退出调频的闭环转为开环 运行;当 $\theta_1 < \theta_2$ 时,判断调速系统对振荡提供了正阻 尼,则不应当退出一次调频闭环,否则有恶化振荡阻 尼的可能。这时应考虑其他抑制振荡的手段。

这一方法使用的是发电厂自身的监测数据进行 判断和控制,不需要与其他地区进行联络和数据交 换。并且,判断过程和判据均简单易实现,采用的变 量能够较为方便地采集。在采集系统具有一定精度 的情况下,通过几个低频振荡周期的判断,即能够确 定调速系统是否为电网振荡提供了负阻尼,因此是 一种能够满足在线应用要求的判断方法。以下通过 仿真算例进行说明。

3 算例分析

为验证本文所提监测方法的有效性和实用性, 本节以4机2区域系统和某实际互联电力系统为例 进行算例分析。

3.1 算例 1(4 机 2 区域系统)

在如图 6 所示的 4 机 2 区域电力系统中,发电机 采用 5 阶,并配置自并励静止励磁系统和 PSS,原动 机采用水轮机模型,系统基准容量 100 MW。当不 计原动机调速系统时,系统主振荡模式为 0.645 Hz, 阻尼比为 0.079 1。使用文献[27]中的调速器结构, 并按其方式给出调速 PID 参数,这里取 PID 参数为 K_P=5、K_I=2、K_D=2,其余参数参考典型值。

有无原动机调速时,系统主振荡模式如表1所示。 可以看到,调速系统的确对系统阻尼有较大影响。

G₄有功功率与机械功率偏差(标幺值)如图 7 所示。可以看到,对于 0.65 Hz 的区间低频振荡,其响应的幅值约能达到电磁功率的 1/6。而根据 1.1 节的分析,即便有较高的阻尼比,电磁功率在 Δω 轴上的投影也不会很高。因而这样大小的机械转矩如果因为调速系统的相位特性落在 Δω 轴的负半轴,就会严重影响系统阻尼比。

表14机2区域系统的主振荡模式 Table 1 Dominant oscillation mode of 4-generator 2-area system

. 9.			
情况	主振荡频率/Hz	阻尼比	
无调速	0.645	0.0791	
有调速	0.651	0.0062	
0.08	ΛΛΛΛΛΛ	0 0 0	0



图 7 G4 有功功率与机械功率偏差



以9号节点负荷增加100 MW 为例进行仿真, 取机端有功功率偏差以及发电机转速偏差,采用6阶 巴特沃斯高通滤波器,截止频率0.5 Hz,得到滤波后 的振荡曲线如图8所示(有功功率偏差和转速偏差均 为标幺值)。



Fig.8 Active power deviation and rotor speed deviation of G_4 after filtering

根据第 2 节所述内容,通过 TLS-ESPRIT 方法使 用 t=20~30 s 之间的数据辨识低频振荡参数,得系 统振荡频率 0.61 Hz,阻尼比 0.013,则 $\theta_1=89.255^\circ$ 。 再通过该时间段的低频振荡数据计算 ΔP_e 与 $\Delta \omega$ 的 夹角,得到 $\theta_2=79.0244^\circ$ 。可以看到, $\theta_1>\theta_2$,可以确定 调速系统提供了负阻尼。辨识结果中的阻尼比误差 是由于调速系统死区的作用。由于振荡过程中频率 波动有一小部分进入了调速死区,而在死区内系统 阻尼比较高,因此造成振荡阻尼比略有提升。

算例中,振荡过程中通过10s的采样判断即能



图 6 4 机 2 区域系统结构 Fig.6 Structure of 4-generator 2-area system

够得出调速对低频振荡提供负阻尼的结论,之后,按 照图 4 中的流程,在 t=30 s 时退出调速闭环,仿真 曲线如图 9 所示(有功功率偏差为标幺值)。可以看 到,振荡以较高阻尼比迅速平息。因此,通过该方法 能够在低频振荡数个周期的时间内快速地发现调速 系统参与振荡并采取适当控制措施,能够快速平抑 系统振荡,具有在线应用的可行性。



图 9 30 s 退出一次调频后 G₄的有功功率响应 Fig.9 Active power response of G₄ after primary frequency modulation is quitted at 30 s

3.2 算例 2(实际互联电力系统)

为进一步研究所提方法的实用性,现以如图 10 所示的某实际互联电力系统为例进行仿真研究。其 中,系统 B 通过 L₁向系统 A 输送功率 $3.2 \times 10^{\circ}$ kW, A₁-A₂断面功率 $3.2 \times 10^{\circ}$ kW,系统基准容量 100 MW。 动态模型方面,区域 A₁中 G₁—G₄采用了文献[24]中 的调速模型。



图 10 某实际互联电力系统结构 Fig.10 Structure of a practical interconnected power system

线路 L₁ 发生三相永久短路 N-1 时,系统 A 与系 统 B 解列,系统 A 中发生区域 A₁、A₂ 相对 A₃—A₆ 的 弱阻尼振荡。联络线 L₂上的功率振荡(标幺值)波 形如图 11 所示。



图 11 L₁ 发生 N-1 事件时 L₂ 上有功功率振荡响应 Fig.11 Active power response of line L₂ when an N-1 event occurs on L₁

采用 TLS-ESPRIT 辨识算法分析得到,此时振荡 频率 0.316 Hz,阻尼比 0.005,属于非常严重的弱阻

尼振荡,根据阻尼比推算,得 θ_1 =89.71°。

发电机群 G₁中一台发电机的功率偏差与转速 偏差(均为标幺值)振荡曲线如图 12 所示。对 t=25~ 40 s 之间的 ΔP_e 和 $\Delta \omega$ 滤波后进行分析,得到 2 个信 号的实际夹角 $\theta_2=75.484^\circ$ 。可以看到, $\theta_2 < \theta_1$,因此调 速系统在这一振荡中提供了负阻尼。



按照图 4 所述,经过 15 s 的计算判断后,在 40 s 时,退出 G₁—G₄的调速闭环,变为开环运行,得到 L₂ 上的功率波动仿真曲线如图 13 所示(功率为标幺值)。 可以看到,停止这些调速的闭环调节后,振荡阻尼得 到了提高,能够很快平息系统振荡,阻尼比为 0.0311。



图 13 40 s 退出 G₁—G₄—次调频时系统振荡曲线 Fig.13 System response after primary frequency modulation of G₁-G₄ is quitted at 40 s

综上所述,在测量系统有一定精度的条件下,该 方法仅利用发电厂侧自身的数据,即能在十几到几 十秒的时间等级内有效判断原动机调速系统对振荡 阻尼的影响,且能通过将振荡过程中的调速回路开 环以提高大电网的阻尼比,具有在线使用的可行性。

4 结论

本文通过对发电机转子方程的分析,明确了发电机转矩在 $\Delta\delta - \Delta \omega$ 平面上的位置与阻尼比的关系, 进而提出了一种区分机械转矩对系统低频振荡影响的方法,并进行了仿真验证。主要结论如下。

a. 在不计原动机调速系统的情况下,对于阻尼

146

比不高的低频振荡而言,发电机电磁转矩 $\Delta P_e = \Delta \omega$ 的夹角为 $\theta_1 = \pi/2 - \xi$,因而可以通过监测量辨识得到 阻尼比后,推算 $\Delta P_e = \Delta \omega$ 的夹角。

b. 考虑了原动机调速系统后, $\Delta P_e - \Delta P_m$ 与 $\Delta \omega$ 夹角变为 π/2-ξ,因而能够通过测量含原动机调速 后的 ΔP_e 和 $\Delta \omega$ 的夹角 θ_2 并与 θ_1 进行比较,来判断 ΔP_m 所处象限,进而确定 ΔP_m 对低频振荡的影响。若 $\theta_1 > \theta_2$,意味着原动机调速系统对系统振荡提供了负 阻尼,反之则表示提供正阻尼。

c. 通过4机2区域系统和某实际电力系统的仿 真研究验证本文所提方法能够在低频振荡的数个周 期时间内完成判断,具有一定的有效性和实用性以 及在线实现的可能性。该方法能够为现场人员提供 一定的工程参考。

参考文献:

[1] 苏寅生. 南方电网近年来的功率振荡事件分析[J]. 南方电网技术,2013,7(1):54-57.

SU Yinsheng. Analysis on the CSG's power oscillation events in recent years[J]. Southern Power System Technology,2013,7(1): 54-57.

 [2] 朱方,汤勇,张东霞,等. 我国交流互联电网动态稳定性的研究及 解决策略[J]. 电网技术,2004,28(15):1-5.
 ZHU Fang,TANG Yong,ZHANG Dongxia, et al. Study on dyna-

The rang, IANG Tong, ZHANG Dongxia, et al. Study on dynamic stability problems of ac interconnected area power grids in china and their solutions [J]. Power System Technology, 2004, 28 (15):1-5.

- [3] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA:McGraw-Hill, 1994:417-418.
- [4] 刘春晓,张俊峰,李鹏,等. 调速系统对南方电网动态稳定性的影响研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(增刊1):74-78.
 LIU Chunxiao,ZHANG Junfeng,LI Peng, et al. Influence of turbine governor on dynamic stability in China Southern Grid
 [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(Supplement 1):74-78.
- [5] 徐衍会,王珍珍,翁洪杰. 一次调频试验引发低频振荡实例及机 理分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(23):119-124. XU Yanhui,WANG Zhenzhen,WENG Hongjie. A low frequency oscillation event caused by primal frequency modulation test and its mechanism analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(23):119-124.
- [6] 覃波,李兴源,胡楠,等. 影响特高压大电源外送系统送电能力的 敏感因素[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):150-156.
 QIN Bo,LI Xingyuan,HU Nan,et al. Sensitive factors affecting transmission capacity of large-scale UHV power supply system
 [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(10):150-156.
- [7] 马燕峰,杜江龙,赵书强.交直流电力系统区域振荡混合控制策略[J].电力自动化设备,2014,34(8):52-56.
 MA Yanfeng,DU Jianglong,ZHAO Shuqiang. Hybrid areal oscillation control strategy of AC-DC power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):52-56.
- [8] 王官宏,陶向字,李文峰,等. 原动机调节系统对电力系统动态稳定的影响[J]. 中国电机工程学报,2008,28(34):80-86.
 WANG Guanhong,TAO Xiangyu,LI Wenfeng,et al. Influence of turbine governor on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(34):80-86.

[9] 王官宏,黄兴. 汽轮机调速系统参数对电力系统阻尼特性的影响
 [J]. 电力自动化设备,2011,31(4):87-90.
 WANG Guanhong,HUANG Xing. Influence of turbine governor parameters on power system damping[J]. Electric Power Auto-

mation Equipment,2011,31(4):87-90.
[10] 竺炜,周有庆,谭喜意,等. 电网侧扰动引起共振型低频振荡的 机制分析[J]. 中国电机工程学报,2009,29(25):37-42.
ZHU Wei,ZHOU Youqing,TANG Xiyi,et al. Mechanism analysis of resonance-type low-frequency oscillation caused by networks side disturbance[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(25): 37-42.

- [11] 盛错,刘复平,刘武林,等. 汽轮机阀门流量特性对电力系统的 影响及其控制策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(7):104-108. SHENG Kai,LIU Fuping,LIU Wulin,et al. Influence of steam turbine valve discharge characteristics on power systems and its control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012,36(7):104-108.
- [12] 徐衍会,贺仁睦,韩志勇. 电力系统共振机理低频振荡扰动源分析[J]. 中国电机工程学报,2007,27(17):83-87.
 XU Yanhui,HE Renmu,HAN Zhiyong. The cause analysis of turbine power disturbance inducing power system low frequency oscillation of resonance mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2007,27(17):83-87.
- [13] 韩志勇,贺仁睦,徐衍会.汽轮机压力脉动引发电力系统低频振荡的共振机理分析[J].中国电机工程学报,2008,28(1):47-51.
 HAN Zhiyong,HE Renmu,XU Yanhui. Study on resonance mechanism of power system low frequency oscillation induced by turbo-pressure pulsation[J]. Proceedings of the CSEE,2008, 28(1):47-51.
- [14] 何映光,刘焘. 汽轮机阀切换操作不当引发的电网低频振荡分析[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):142-145.
 HE Yingguang,LIU Tao. Analysis of power grid low frequency oscillation caused by improper turbine value switchover [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):142-145.
- [15] 徐衍会,马骢,邓小文,等.汽轮机阀门控制方式切换引发低频 振荡的实例及其机理分析[J].电力自动化设备,2015,35(3): 170-174.

XU Yanhui, MA Cong, DENG Xiaowen, et al. Case of low-frequency oscillation induced by steam turbine valve control mode switchover and its mechanism analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3):170-174.

- [16] 于达人,郭钰锋,徐基豫.发电机组并网运行一次调频的稳定性
 [J].中国电机工程学报,2000,20(9):59-63.
 YU Daren,GUO Yufeng,XU Jiyu. The primary frequency regulation stability of parallel turbo-generators[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(9):59-63.
- [17] 文贤馗,钟晶亮,钱进. 电网低频振荡时汽轮机控制策略研究
 [J]. 中国电机工程学报,2009,29(26):107-111.
 WEN Daokui,ZHONG Jingliang,QIAN Jin. Research on the control strategy for turbine on low-frequency oscillation [J].
 Proceedings of the CSEE,2009,29(26):107-111.
- [18] 竺炜,谭平,周孝信. 低频振荡时的汽轮机调速控制方式在线调整策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):87-91.
 ZHU Wei,TAN Ping,ZHOU Xiaoxin. An on-line adjusting strategy for turbine speed control under low frequency oscillation [J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):87-91.
- [19] 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.

第36卷

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.

[20] 张国云,张兢. 基于模糊支持向量机的多级二叉树分类器的水 轮机调速系统故障诊断[J]. 中国电机工程学报,2005,25(8): 100-104

ZHANG Guoyun, ZHANG Jing. Fuzzy SVM-based multilevel binary tree classifier for fault diagnosis of hydroturbine speed regulating system [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 100-104.

- [21] 杨东俊,丁坚勇,邵汉桥,等. 基于 WAMS 的负阻尼低频振荡与 强迫振荡的特征判别[J]. 电力系统自动化,2013,37(13):57-61. YANG Dongjun, DING Jianyong, SHAO Hanqiao, et al. WAMSbased characteristic discrimination of negative damping lowfrequency oscillation and forced oscillation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 57-61.
- [22] 杨东俊,丁坚勇,周宏,等. 基于 WAMS 量测数据的低频振荡机 理分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(23):24-27. YANG Dongjun, DING Jianyong, ZHOU Hong, et al. Mechanism analysis of low-frequency oscillation based on WAMS measured data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 24-27.
- [23] 秦晓辉,毕天姝,杨奇逊. 基于 WAMS 的电力系统机电暂态过 程动态状态估计[J]. 中国电机工程学报,2008,28(7):19-25. QIN Xiaohui, BI Tianshu, YANG Qixun. Dynamic state estimator based on WAMS during power system transient process [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 19-25.
- [24] 李文锋,李莹,周孝信,等. 基于 WAMS 的电力系统功率振荡分 析与振荡源定位(2)力矩分解法[J]. 中国电机工程学报,2013, 33(25):47-53.

LI Wenfeng, LI Ying, ZHOU Xiaoxin, et al. Power system oscillation analysis and oscillation source location based on WAMS part 2:method of torques decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 47-53.

[25] 蒋平,吴熙,罗曦. 基于 TLS-ESPRIT 算法的附加励磁阻尼控制 抑制次同步振荡[J]. 电力自动化设备,2009,29(10):25-29. JIANG Ping, WU Xi, LUO Xi. SSO mitigation using supplementary excitation damping controller based on TLS-ESPRIT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 25-29.

[26] 王慧铮,许勇. 基于广域测量系统的低频振荡监测分析方法研 究与应用[J]. 电网技术,2008,32(22):56-61. WANG Huizheng, XU Yong. Research and application of low frequency oscillation monitoring and analysis method based on WAMS[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 56-61.

[27] 魏守平. 水轮机调节 [M]. 武汉:华中科技大学出版社,2009: 32-33.

作者简介:



夲

勇(1971-),男,湖北荆州人,高 李 级工程师,硕士,从事电网生产运行管理工 作(E-mail:liyong@cc.sgcc.com.cn);

刘子全(1989-),男,江苏盐城人,博 士研究生,主要从事与大电网大机组安全 稳定控制相关的研究(E-mail: liu_ziquan_sgo@qq.com);

奚江惠(1975-),女,江苏无锡人,高 级工程师,硕士,从事电网运行分析和管理工作(E-mail:xijh@cc. sgcc.com.cn);

党 杰(1981-),女,河南南阳人,高级工程师,博士、从 事电网运行分析和计算工作(E-mail:dangj@cc.sgcc.com.cn);

姚 伟(1983-),男,湖北浠水人,副教授,博士,通信作 者,主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制(E-mail: w.yao@hust.edu.cn);

文劲宇(1970-),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导 师,研究方向为大电网大机组安全稳定控制、储能与新能源并 网、微网与舰船电力系统等(E-mail:jinyu.wen@hust.edu.cn)。

Way to identify influence of governor system on low frequency oscillation

LI Yong¹, LIU Ziquan², XI Jianghui¹, DANG Jie¹, YAO Wei², WEN Jinyu²

- (1. Central China Power Dispatching and Control Branch of State Grid Company of China, Wuhan 430077, China;
 - 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and

Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: It is difficult to online analyze the influence of governor system on LFO(Low Frequency Oscillation) due to the fact that mechanical power cannot be measured directly. Based on the torque analysis, the relationship among the deviations of rotor speed, electromagnetic power and mechanical power on angle-speed plane is respectively discussed for the generator with and without governor system, which shows that, if the governor provides negative damping torque, the angle θ_2 between rotor speed deviation and electrical power deviation will be less than $(\pi/2-\xi)(\pi/2)$ minus LFO damping ratio ξ , if the governor provides positive damping torque, then θ_2 will be greater than $(\pi/2-\xi)$. Therefore, a way to online identify the influence of turbine governor system on LFO is proposed based on the monitored variables. The relationship between θ_2 and $(\pi/2-\xi)$ is determined according to the online detected ξ and monitored θ_2 , and then whether the governor system provides negative damping torque for LFO is identified. The simulative results for a 4-generator 2-area system and a real interconnected power system show that, after the negative damping torque provided by the governor for LFO is identified, the governor is then set in the open-loop control mode to increase the LFO damping ratio, verifying the effectiveness and practicability of the proposed way.

Key words: turbine governor system; low frequency oscillation; monitoring; torque analysis; damping

148