

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.01.001

电力系统频率问题浅析与频率特性研究综述

陈雪梅, 陆超, 韩英铎

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要:现代电力系统的发展使得系统频率特性更加复杂化,同时系统安全稳定经济运行对频率稳定提出了更高的要求,电力系统频率问题日益显著,关于系统频率特性的研究涌现并被应用于保障系统安全稳定运行。首先回顾了近年来国内外电力系统频率事故的发展过程并结合事故过程中频率特性分析事故原因,结合现代电力系统的特点从多角度分析了高比例电力电子接口装置接入对电力系统频率特性的影响,然后以单机模型为例分析了机组参数对电力系统频率动态过程的多重交互影响,并总结了系统惯量估计、发电机组调频性能监测和两者共同作用对系统频率动态行为影响监测的相关研究及应用情况。最后提出了在未来系统频率特性领域值得探索研究的问题和方向。

关键词:频率特性;频率调节;电力电子接口装置;惯量估计;调频性能监测

中图分类号:TM732

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)01-0001-09

0 引言

电力系统频率依赖于发电功率和用电功率的平衡,是衡量电能质量的重要指标,同时也是影响电力系统稳定运行的重要参数。系统在正常运行状态下各处的频率相等且稳定以保证有功功率的供需平衡。当系统因外部扰动(如机组启停、负荷变化、线路投切及断路故障等)而突然产生有功功率缺额时,系统频率会从正常运行状态过渡到一个新的稳态或失稳状态,这一过程称为系统频率的动态过程。

现代电力系统中,系统结构复杂化、组成成分丰富化、调节手段多样化使得电力系统频率特性日益复杂,主要体现在:(1)随着电网覆盖的地域更加广阔,大型互联同步电网地理分布和网络联结的不均匀性、机组及其控制器的参数差异性、各地区负荷水平不均匀性等因素导致电力系统频率特性具有明显的时空分布特性^[1-2];(2)西电东输的发展促进了远距离、大容量输电的发展,单元输电线路的大潮流化会降低线路事故时系统发受两端的频率稳定性^[3];(3)以新能源发电、储能系统、柔性高压直流输电、新式负荷和微电网为代表的“源-网-荷”全环节的规模化采用电力电子变换装置与系统相联导致系统惯性水平下降、备用容量减小,降低了系统的频率支撑能力^[3-5]。同时,电力系统的安全、稳定、经济运行对系统频率稳定提出了更高的要求,主要表现在:(1)新能源发电具有随机性、波

动性和不可准确预测性等特点,频率稳定是系统消纳这些可再生能源发电的重要前提^[6];(2)大型机组对系统频率偏移的要求更加苛刻,频率过高或过低都有可能引起保护装置的动作,更容易发生频率偏移的连锁事故;(3)工业的发展以及制造工艺的精细化使得一些高新技术负荷对系统频率要求更加严格,容许的频率偏差更小。

因此,文中对电力系统频率特性的研究进行了综述。以电力系统事故中频率问题日益严重为背景,探究高比例电力电子接口装置接入对电力系统频率特性的影响,以单机模型为例分析功率失衡时系统频率动态过程以及发电机组对其动态特性的影响情况,介绍了系统惯量以及调频性能监测的方法,最后针对提升现代电力系统频率稳定与频率支撑能力等问题提出相应的工作建议。

1 电力系统事故中的频率问题

频率异常会严重影响系统安全稳定运行,世界范围内多起大停电事故过程中,频率波动超出正常运行范围进一步恶化了事态的发展。对事故过程及其原因进行总结有助于分析现代电力系统存在的安全隐患以及频率特性在电力系统事故中所起到的作用。

1.1 “9·19”锦苏直流双极闭锁事故

华东电网作为典型的多馈入直流特大型受端电网,直流大功率时双极闭锁事故会导致系统频率异常,严重威胁电网频率的安全稳定。其中,具有代表性的事故是“9·19”锦苏直流双极闭锁事故^[7]。

2015年9月19日21:58:02,锦苏直流发生双

收稿日期:2019-11-03;修回日期:2019-12-27

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904500)

极闭锁事故,导致华东电网损失功率约 4 900 MW, 12 s 后全网频率最低跌至 49.58 Hz,随后系统频率处于低于 49.8 Hz 的水平长达 221 s。最后通过电网动态区域偏差动作以及华东网调的紧急调度,在故障发生 240 s 后,系统频率恢复到正常水平,整个事故过程的频率变化过程见图 1。事故过程中频率变化的主要特点是频率偏差大且频率调整响应慢。

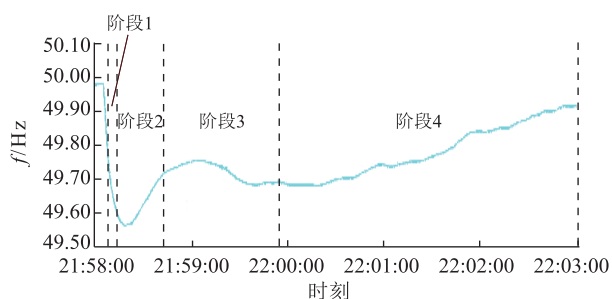


图 1 锦苏直流闭锁事故中频率变化过程

Fig.1 Frequency in DC pole block accident

根据华东电网的情况以及事故过程中频率变化情况分析该系统频率主要问题:

(1) 一次调频能力不足。发电机组的一次调频动作响应时发生频率波动事件时的主要调节手段,故障过程中,若所有机组按照理想的一次调频动作(调频动作死区 0.033 Hz,限幅为额定功率的 6%,调差系数为 5%),理论上估算华东电网频率最大跌落为 0.093 Hz^[8-9]。而实际系统频率变化的情况与理想情况差距较大,说明华东电网机组一次调频能力不足。

(2) 二次调频响应速度慢。二次调频决定了系统频率恢复的速度,而事故过程中频率长时间处于较低水平,表明系统二次调频长时间未动作。若二次调频及时动作,系统频率偏差会减小,且更快恢复到稳定状态,从而保障系统频率稳定。

1.2 英国“2019·8·9”大停电事故

英国当地时间 2019 年 8 月 9 日 16:54:00 左右,英格兰及威尔士地区发生大规模停电事故,事故造成部分铁路和公路设施瘫痪,对居民生活、工业生产和社会活动产生了极其严重的影响。事故过程中频率变化如图 2 所示,英国国家电网 9 月 6 日发布的事件调查报告^[10]表明:事故源于独立并发的多重事件,造成突发大功率缺额,导致系统频率快速下降,进而触发低频切负荷动作^[11]。雷击导致线路发生单相接地故障,触发线路保护动作。雷电导致嵌入式电源(分布式光伏、小型燃气和燃油机组)脱网,与此同时霍恩熙(Hornsea)海上风电和小巴福德(Little Barford)燃气机组的非预期脱网,累计

造成 1 878 MW 功率缺额,而英国电网仅仅预留了 1 000 MW 的旋转备用容量,导致系统频率最低下降到了 48.8 Hz,触发低频减载装置动作,切除英格兰和威尔士系统 5% 负荷以保证剩下 95% 负荷的正常工作。

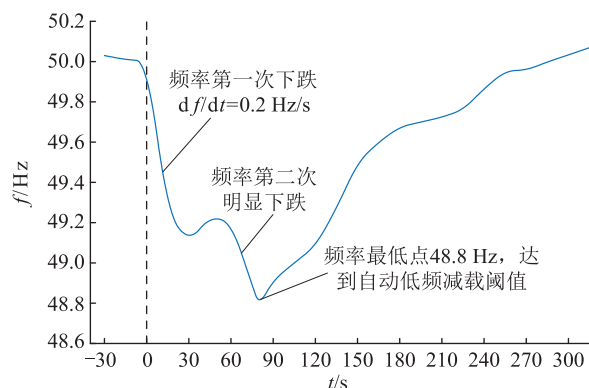


图 2 英国“2019·8·9”大停电事故频率变化

Fig.2 Frequency on the events of 9 August 2019

造成这场严重停电事故的原因包含对电网运行认识不足导致单相 $N-1$ 故障造成近区风电、常规电源非预期脱网以及风电涉网能力不足^[11]等。除此之外,值得关注的是与频率特性相关的原因:

(1) 备用容量预留不足导致系统弹性水平较低。备用容量对保持系统功率供需平衡、调节系统频率以及保证系统稳定运行具有重大意义。该事故发生前英国电网按照标准仅预留了 3% 的旋转备用。多个独立并发事件造成的功率缺额超出当日标准所确定的设防要求,导致频率下降速度达到了 0.2 Hz/s,较高的频率变化速率(rate of change of frequency, RoCoF)触发了 RoCoF 保护动作又导致了 350 MW 的分布式电源跳闸脱网,进一步导致频率下降,形成连锁反应,最终导致低频减载动作。

(2) 技术报告中没有关于事故发生是由于系统惯量水平不足的表述。由表 1 事故发生前英国电力系统的发电类型及其占比可知,大量新能源和高压直流等电力电子设备(占事故发生前发电量的 47%)接入电网,非同步电源代替同步发电机会使得系统惯量偏小。但技术报告也表明事故过程中约 90% 的频率响应(含一次调频和二次调频)性能与日常分析计算的假设基本吻合。这表明快速且性能较好的频率响应控制能够弥补系统惯量较小的不足,惯量偏低并未直接导致系统频率事故的恶化(350 MW 分布式电源脱网关键原因是由于其涉网保护不正确)。

由国内外典型的频率问题导致的系统事故可知,保证系统备用容量来提高电网弹性水平,加强

表 1 2019 年 8 月 9 日 16:00 英国电网发电类型

Table 1 Transmission connected generation at 16:00 on August 9, 2019

| 发电类型 | 出力大小/GW | 占比(总负荷约为 33 GW)/% |
|--------|---------|-------------------|
| 天然气发电 | 8.4 | 25 |
| 核能发电 | 6.2 | 19 |
| 生物质发电 | 1.6 | 5 |
| 燃煤发电 | 0.5 | 2 |
| 高压直流输电 | 2.3 | 7 |
| 风力发电 | 8.9 | 27 |
| 分布式风光 | 4.4 | 13 |

调频系统的管理和优化发电机调频控制来提升系统一、二次调频能力,能够有效地阻止频率恶化事故的发生,保证现代电力系统的频率稳定。

2 高比例电力电子装置接入对频率特性的影响

随着新能源发电的接入、直流输电的发展、柔性交流输电系统技术的成熟、负荷侧的电力电子化、储能的规模化,高电压、大容量、高可控的电力电子设备渗入到电力系统“发-输-用-储”等多个环节^[12]。电力系统的电力电子化提升了系统的绿色性、可控性与经济性,但同时使得系统频率特性复杂化。高比例电力电子接口设备的接入对频率特性的影响是多重的,其自身特性可能会导致频率特性恶化,但是某些特性或相关技术又能够使其具有频率支撑能力。

2.1 负面影响

电力电子接口装置大比例渗入电网恶化了电力系统频率特性,主要表现在以下 2 个方面:

(1) 增加了系统不平衡功率冲击。新能源发电主要依靠风能、太阳能等清洁的一次能源进行发电,所以新能源发电具有间歇性、随机性、不可预测性以及波动性的固有特点,而新能源出力的快速波动性加剧了电网瞬时功率的不平衡。同时由于风电机组对频率波动的敏感性而出现易脱网的问题,大规模风电脱网情况下给系统带来了更大的功率缺额,造成电网的频率骤降。新能源的特点导致系统功率扰动增加,给系统频率控制以及频率稳定带来了严峻的挑战。

此外,我国交直流混联的运行格局中存在大量大型受端电网,大容量的高压直流输电在向负荷中心输电时,若出现单回甚至多回直流闭锁事故,大功率缺额会使得系统频率下降。以华东电网为例,近年来发生多起直流闭锁事故^[7],严重威胁了系统频率稳定。

因此,新能源发电的波动性、大容量直流易发生闭锁事故等都会给系统带来不平衡功率冲击,引起频率波动,严重时可能会导致频率越限而危及电网安全稳定运行。

(2) 降低了系统频率支撑能力。电力电子接口与传统机械接口的物理结构上的不同使得并网装置的源侧输入机械功率与网侧输出电磁功率解耦且源侧有功功率与系统频率解耦,因此也不具备响应频率变化的惯性特性^[13-14]。式(1)是同步发电机组的惯量 H_g 表达式。当不考虑负荷的惯量时,系统的有效惯量 H_{sys} 如式(2)所示。当大规模电力电子化电源置换原来的同步机组后,系统等效惯量 H_{equ} 如式(3)所示。

$$H_g = \frac{J_g \omega_g^2}{2S_N} \quad (1)$$

$$H_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{g,i}}{\sum_{i=1}^n S_{N,i}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{J_{g,i} \omega_{g,i}^2}{2}}{\sum_{i=1}^n S_{N,i}} \quad (2)$$

$$H_{equ} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{J_{g,i} \omega_{g,i}^2}{2}}{\sum_{i=1}^n S_{N,i} + \sum_{j=1}^m S_{M,j}} \quad (3)$$

式中: J_g 为机组的转动惯量; ω_g 为额定转速; S_N 为机组额定容量; S_M 为非同步电源的容量。

由此可知,非同步电源置换了大量本地常规机组会降低系统的机械转动惯量。同时,电力电子接口设备无法响应系统频率变化的特性会导致系统原有频率自调节能力的减弱和缺失。因此,电力电子设备的大规模渗入系统会极大削弱系统的频率支撑能力。

2.2 正面影响

电力电子装置的高可控性使得其具有“潜在”频率调节能力。为解决高比例新能源系统接入带来的频率问题,相关研究通过在新能源发电控制中增加对新能源发电输出的有功功率附加控制^[15-17],从而模拟出同步发电机的频率响应特性,来提升系统的频率支撑能力。

储能系统具有响应快速、运行灵活、跟踪精确的特点,是频率调节的新手段。随着储能技术的日益成熟和国内外市场的激励,调频服务成为全球规模化储能示范项目开展最多的应用领域之一,也是最接近商业化运用的模式,已经逐步渗透到电网的发电端、输配电以及需求侧,储能的主要参与方式及其特点如表 2 所示^[18]。

表2 储能参与电力系统调频方式
Table 2 Features in regulation operating modes of energy storage

| 储能配置位置 | 运行方式 | 储能主要作用 |
|--------|---------|---|
| 发电端 | 辅助火电机组 | 储能辅助火电机组快速准确地响应电网功率调节指令,改善机组的二次调频性能 |
| | 联合新能源 | 储能平抑新能源发电波动实现高比例消纳,且参与频率调节功率,提高新能源发电的调频性能 |
| 输配环节 | 独立并网 | 减小调节区域控制偏差时供受区域联络线损耗,并缓解拥塞 |
| 需求侧 | 分布式集群控制 | 联结多个用户储能集成虚拟储能系统参与频率控制服务 |

利用新能源发电参与频率响应以及安装储能提升系统频率支撑能力的方法,受限于系统安全稳定运行、附加控制的成本、储能成本以及容量大小,在电力系统实际运行中作用有限。

3 机组参数对频率动态过程的影响

由第1节分析可知,扰动下频率动态变化过程决定了事故发展的形态。当系统频率变化超过允许范围而处于异常状态时,若不采取一定的措施对频率进行调节,会使得频率稳定恶化而发生连锁反应。因此,机组的频率调节过程将影响系统频率的动态过程。

电力系统频率对功率波动的动态响应过程在不同时间尺度上受机组不同特性的影响。以频率过程的单机模型为例^[19],其系统方程如式(4)所示。

$$\begin{cases} T_s \frac{d\Delta f}{dt} = -\Delta P_{ol} \\ T_C \frac{d\Delta P_C}{dt} + \Delta P_C = -k_C \Delta f \\ \Delta P_D = k_D \Delta f \\ \Delta P_{ol} = \Delta P_D - \Delta P_C + \Delta P_{ol0} \end{cases} \quad (4)$$

式中: Δf 为频率偏差; T_s 为机械启动时间($T_s = 2H$, H 为系统惯量常数); T_C 为调速器时间常数; k_D 为系统负荷频率调节效应系数; k_C 为发电机组功频静态特性系数($k_C = 1/\delta$, δ 为调速器的调差系数); ΔP_D , ΔP_C , ΔP_{ol} 分别为负荷侧、发电机侧以及系统侧的功率缺额; $\Delta P_{ol0} = \Delta P_{D0} - \Delta P_{C0}$,为系统初始功率扰动。求解式(4)可得功率扰动下系统频率动态过程如图3所示^[15]。

由单机模型的分析可知,机组参数对系统频率动态特性影响情况:

(1) RoCoF。系统的最大RoCoF发生在扰动瞬间,其值 $-\Delta P_{ol0}/T_s$ 只与 H 相关,但随后RoCoF大小

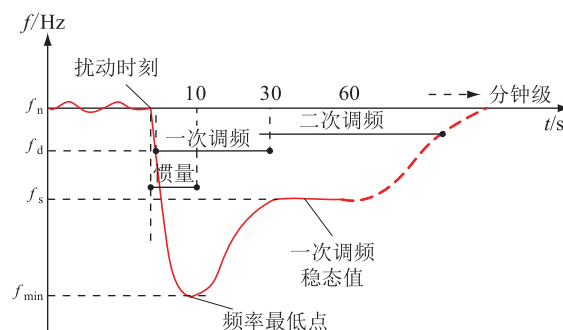


图3 电力系统频率动态过程

Fig.3 Power system frequency dynamics

与机组一次调频的调速器参数 T_C 等也有关。

(2) 频率最大偏差。与机组 k_C , T_s , T_C 等参数均有关,当 k_C , T_s 增大或 T_C 减小时,频率最大偏差均将减小。

(3) 频率稳态偏差。与系统频率调节效应系数 k_s 成反比, $k_s = k_C + k_D$ 。

通过选取不同机组参数对式(4)过程仿真得到频率动态过程如图4所示。分析可知,调速器参数以及机组固有机械转动惯量对功率扰动时的系统频率动态过程的影响是多重且交互的。

传统意义上,惯量可以用机组旋转质量贡献的惯性常数 H 来表征,其决定了扰动瞬间的RoCoF的最大值。但由图3可知,频率动态过程中惯量响应与一次调频作用时间界限不明,因此功率扰动下的频率动态变化是惯量与一次调频响应共同作用的效果。由第2节分析可知,区域电网随着新能源发展和直流馈入电源的增长,受端电网转动惯量减小已成为客观事实,由图4(c)可知,惯量减小会导致功率缺额下频率动态特性恶化,然而从图4(a)、(b)可知,调节调速器的调差系数或时间常数也能够改变功率扰动下频率动态过程。以图4(b)、(c)为例,若想要频率最大偏差减小0.1 Hz,可以通过将惯量常数从4 s增加到8 s,也可以将调速器时间常数从10 s减小到5 s,但惯量增加一倍的附加成本远高于调节调速器参数。由此可知提升一次调频的性能是更加经济有效地加强系统抑制频率波动能力的方法。

此外,由于一次调频是有差调节,为了消除一次调频留下的频率偏差,发电机组还采用调节原动机出力的设定值来改变原动机输出功率的二次调频。二次调频受能量转换过程的时间限制,对频率的响应速度相对较慢。二次调频作用下频率变化过程如图3红色虚线部分所示。一次调频和二次调频作用时间不同,两者相互配合共同实现对系统大扰动后的频率调整。

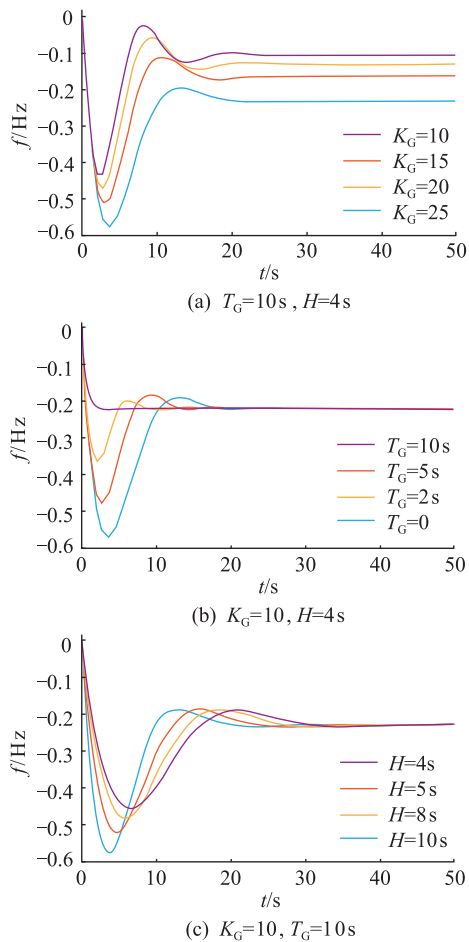


图4 机组参数对频率动态过程的影响
Fig.4 Influence of generator parameters on frequency dynamics

4 发电机组参与频率响应的特性监测

由第3节分析可知,机组特性影响了功率扰动下频率动态过程,有效监测发电机组的频率响应特性对系统安全稳定运行具有重要作用。

4.1 惯量监测

随着多种非同步成分通过电力电子设备集成到大容量交流电网中,现代电力系统惯量的组成成分复杂且多变。因此有效且准确监测系统惯性对系统频率稳定以及经济运行有着重要意义。

传统方法通过动态参数估计的方式估计出每个发电机的惯量常数^[20],再通过式(1)对系统总惯量进行计算。而广域量测技术的发展与相量测量单元(phasor measurement units, PMUs)在电力系统的广泛安装为实现高精度在线估计系统惯量提供了支撑,更加准确、有效的惯量估计方法逐渐被提出。系统等效惯量的组成由单一的同步机旋转惯量拓展到旋转惯量、虚拟惯量^[21](虚拟惯性控制)、储能惯量和负荷侧惯量^[22]等多种形式的惯量^[23]。

等效惯量反映了系统有功功率缺额与频率变化率之间的关系,其具有非线性和时变性的特点。

(1) 基于扰动的方法。在扰动发生瞬间,发电机频率控制系统还未动作,式(4)可等效为式(5)所示的摇摆方程。

$$2H \frac{df(t)}{dt} = \Delta P_m(t) - \Delta P_e(t) = \Delta P(t) \quad t = t_0^+ \quad (5)$$

式中: $df(t)/dt$ 为系统标么化的RoCoF; $\Delta P_m(t)$, $\Delta P_e(t)$, $\Delta P(t)$ 分别为系统标么化的总机械功率变化量、总电功率变化量和总的功率变化; t_0^+ 为扰动发生后极短一段时间内。

最早基于扰动后摇摆方程对系统惯量进行估计时,采用单节点的测量数据以及已知扰动大小^[24-25]对系统惯量进行粗略估计。为了提高辨识精度,文献[26-27]通过数据窗的方式获取扰动前后瞬间的节点功率和频率计算更准确的功率差值 ΔP 以及RoCoF;文献[28]为了准确估计英国电网的惯量,采用去趋势分析法(detrended fluctuation analysis, DFA)选择最适当的频率事件并获取扰动事件发生的确切时间;文献[29]则充分考虑各种来源(发电机调速器、电压和频率依赖型负荷)的功率偏差导致的有功功率的变化,分别采用R方法和V方法量化扰动后系统频率和电压动态特性对功率偏差的影响。

基于摇摆方程的惯量估计方法的精度依赖于扰动时刻、扰动后功率偏差、扰动后RoCoF等参数的获取,因此对采样数据要求高。文献[30]提出一种基于系统机电振荡参数与动态参数之间关系的惯量估计方法。该方法只需要获取联络线有功功率,且不局限于扰动发生后较短时间内。

为了实现多工况地对具有时变性和非线性的系统等值惯量进行估计,文献[31]提出一种对系统安全性影响更小的基于小扰动的惯量估计方法。通过对联合输入-输出的闭环系统输入多重正弦信号的微扰动法(microperturbatio method, MPM)辨识出系统频率偏差 Δf 与有功功率变化 ΔP 之间的一阶传递函数。

(2) 基于非扰动时期系统特性的方法。基于扰动的惯量估计方法局限在于只能在确定扰动后进行,而惯量计算所需的后续时间使得减小扰动对系统稳定性影响所需的有效动作被推迟^[32]。因此相关研究也提出了基于非扰动时期系统特性的方法。文献[33]提出基于频率和有功功率类噪声数据的系统惯量估计的方法。通过建立以系统每个区域

负荷功率变化作为输入,频率偏差作为输出的多输入输出(multi-input multi-output, MIMO)模型,利用自回归移动平均模型(auto-regression and moving average model, ARMAX)对模型进行辨识,得到MIMO系统中与惯量响应相关的参数。该文献提出有效惯量的定义且在模型中充分考虑了一次调频影响,验证了采用类噪声数据对系统惯量进行估计的有效性和可行性。

4.2 机组调频性能监测

随着电力系统频率问题的日益突出,为了解决系统自动调频和调度管理能力不足的问题,华北电网发布“两个细则”^[34]、南方电网开放调频辅助服务市场^[35]等政策,加大了对发电机组调频性能的监测。通过制定严格的考评和奖惩方法,鼓励发电厂提供优质的调频服务。因此,有效监测机组调频性能进行有助于掌握系统调频资源的频率支撑能力,并规范和鼓励机组充分发挥调频能力,对电网的安全稳定运行和未来智能电网环境下的优化调度具有重要意义^[36]。

机组一次调频监测主要采用静态参数(调频死区、调差系数)、动态参数(响应延时、调节速率)以及调频贡献度等指标反映机组一次调频的调节性能与投入情况^[37]。机组二次调频性能的评估主要关注机组跟踪调频指令的情况,通常选用的考核指标有:机组跟踪负荷的能力、可用率、响应时间、调节速率、调节精度、调节容量、调频里程、不合格时间段等^[38-39]。通过综合考虑机组的调频效果和调节贡献度来评估机组二次调频的性能。

4.3 频率调节手段对系统动态行为影响监测

估计现代电力系统的总惯量并监测机组的调频性能有助于掌握电力系统的频率支撑能力,并规范机组的行为。但对系统而言最为直观的体现是扰动下频率动态行为,通过对系统频率最大动态RoCoF、最大动态频率偏差^[40]、到达最大频率偏差的时间^[41]以及稳态频率偏差等指标进行评估来反应频率调节手段的性能及其相关性^[42]。分析和研究表明,不同的频率调节手段对不同指标的影响程度不一样,通过对相关参数进行调节可以对频率动态行为进行控制。

量化频率调节相关参数如惯量常数、调速器死区、调差系数等与频率动态特性之间的关系^[43],探究不同调节手段对频率行为影响的机理是未来值得关注和研究的方向。

5 展望

现代电力系统事故中频率问题日益突出,系统

频率特性逐渐引发大家的关注与重视。电力电子接口设备的规模化减小了系统机械转动惯性、削弱了系统频率调节能力成为电力系统的客观事实。而同步发电机频率调节是影响功率不平衡下频率动态特性的重要手段。故而有效监测现存调频资源的频率响应特性对电力系统安全稳定运行具有重要意义。

但系统的频率问题的研究还需要从多角度多方位进行。

(1) 研究新能源发电、不同类型负荷的惯量在线估计方法。在惯量监测方面,现有研究主要关注于同步发电机以及系统总惯量的估计,而研究电力系统其他组成部分对系统总惯量的影响在电力系统规划、经济调度等环节具有重要作用;

(2) 研究一次调频特性对系统等值惯量的影响。惯量响应不仅需要考虑到机械转动惯量的作用,调速器参数对等值惯量的作用不容忽视,在机械转动惯量变小的客观事实下,优化一次调频控制的方法经济性更优。

(3) 研究考虑不同类型电源一次调频和负荷频率变化的系统综合频率特性在线辨识方法。高比例电力电子化设备接入电网,对电力系统频率特性产生了多重影响,因此在频率特性研究应当充分考虑现代电力系统的发展;

(4) 在频率特性研究基础上,研究系统发生功率缺额时电网频率变化最大速度和幅度的预估模型。通过预估RoCoF最大值以及频率变化最大幅度,可以得到电网当前运行点频率稳定裕度或动态储备能力等评价指标,开展电力系统频率稳定的量化研究。

6 结语

频率稳定是电力系统安全稳定运行的重要前提,随着电力系统的发展,系统频率特性复杂且多变。国内外多起事故中频率问题显著,文中以两起典型事故为例对电力系统存在的频率问题进行了简要分析。同时,以电力电子接口装置的比例增大这一现代电力系统的重要特征为代表说明了电力系统发展对频率特性的多重影响。然后以单机模型为例展示了频率动态变化的过程以及机组频率调节相关参数对频率特性的影响情况。为了更好地掌握系统频率变化情况,需要对调频资源的性能进行监控,文中介绍了惯量监测的相关方法、机组频率调节的性能监测过程以及机频率动态特性的监测手段。

频率问题已经逐渐得到了广泛的关注,现代电力系统频率特性复杂且惯量减小已成为客观事实。电力系统各因素与频率变化之间机理是什么,如何通过现有手段加强对频率调节参数的辨识、对频率特性的监测以及对调频资源的控制成为未来电力系统频率领域亟待解决的问题。

参考文献:

- [1] 韩英铎, 闵勇, 洪绍斌. 复杂扩展式电力系统功率频率动态过程分析[J]. 电力系统自动化, 1991(4):25-30.
HAN Yingduo, MIN Yong, HONG Shaobin. Analysis of power-frequency dynamics in large scall multi-machine power systems [J]. Automation of Electric Power System, 1991(4):25-30.
- [2] 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.
- [3] 邓晖, 楼伯良, 华文, 等. 基于直流闭锁事故的华东电网频率特性及控制措施[J]. 广东电力, 2018, 31(2):76-81.
DENG Hui, LOU Boliang, HUA Wen, et al. Frequency characteristic of east china power grid based on DC block accidents and control measures [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(2):76-81.
- [4] BLAABJERG F, DAN M I. Renewable energy devices and systems-state-of-the-art technology, research and development, challenges and future trends [J]. Electric Machines & Power Systems, 2015, 43(12):1319-1328.
- [5] BEVRANI H, GHOSH A, LEDWICH G. Renewable energy sources and frequency regulation: Survey and new perspectives [J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 4(5):438-457.
- [6] 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.
- [7] 李兆伟, 吴雪莲, 庄侃沁, 等. “9·19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7):149-155.
LI Zhaowei, WU Xuelian, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis and reflection on frequency characteristics of east china grid after bipolar locking of “9·19” Jinping-Sunan DC transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7):149-155.
- [8] KUNDUR P. Power system stability and control [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [9] 宣晓华, 尹峰, 张永军, 等. 特高压受端电网直流闭锁故障下机组一次调频性能分析[J]. 中国电力, 2016, 49(11):140-144.
XUAN Xiaohua, YIN Feng, ZHANG Yongjun, et al. Analysis on primary frequency regulation performance of the units under DC blocking fault in UHV receiving end power grid [J]. Electric Power, 2016, 49(11):140-144.
- [10] NATIONAL GRID ESO. Technical report on the events of 9 August 2019 [EB/OL]. (2019-09-06) [2019-12-24]. https://www.ofgem.gov.uk/system/files/docs/2019/09/eso_technical_report_-_final.pdf.
- [11] 方俊杰. 英国“8·9”停电事故对频率稳定控制技术的启示 [J/OL]. 电力系统自动化:1-5 (2019-10-31) [2019-12-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20191031.1417.010.html>.
FANG Yongjie. Reflections on frequency stability control technology based on the blackout event of 9 August 2019 in UK [J/OL]. Automation of Electric Power Systems:1-5 (2019-10-31) [2019-12-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20191031.1417.010.html>.
- [12] 鲁宗相, 汤海雁, 乔颖, 等. 电力电子接口对电力系统频率控制的影响综述[J]. 中国电力, 2018, 51(1):51-58.
LU Zongxiang, TANG Haiyan, QIAO Ying, et al. The impact of power electronics interfaces on power system frequency control: a review [J]. Electric Power, 2018, 51(1):51-58.
- [13] ZHANG W, CANTARELLAS A M, ROCABERT J, et al. Synchronous power controller with flexible droop characteristics for renewable power generation systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4):1572-1582.
- [14] DREIDY M, MOKHLIS H, MEKHILEF S. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: a review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 69:144-155.
- [15] 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):64-73.
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 System, 2019, 43(15):64-73.
- [16] 张旭, 陈云龙, 岳帅, 等. 风电参与电力系统调频技术研究的回顾与展望 [J]. 电网技术, 2018, 42(6):1793-1803.
ZHANG Xu, CHEN Yunlong, YUE Shuai, et al. Retrospect and prospect of research on frequency regulation technology of power system by wind power [J]. Power System Technology, 2018, 42(6):1793-2803.
- [17] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2):163-170.
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2):163-170.
- [18] 孙冰莹, 杨水丽, 刘宗歧, 等. 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11):8-16.
SUN Bingying, YANG Shuili, LIU Zongqi, et al. Analysis on

- present application of megawatt-scale energy storage in frequency regulation and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power System, 2017, 41(11):8-16.
- [19] 闵勇. 复杂扩展式电力系统中功率-频率动态过程的分析及低频减载装置整定[D]. 北京:清华大学, 1990.
MIN Yong. Analysis of power-frequency dynamics and designation of underfrequency load shedding scheme in large scale multi-machine power systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 1990.
- [20] ARIFF M A M, PAL B C, SINGH A K. Estimating dynamic model parameters for adaptive protection and control in power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2):829-839.
- [21] WANG Y, DELILLE G, BAYEM H, et al. High wind power penetration in isolated power systems-assessment of wind inertial and primary frequency responses[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):2412-2420.
- [22] BIAN Y, WYMAN-PAIN H, LI F, et al. Demand side contributions for system inertia in the GB power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4):3521-3530.
- [23] 曾繁宏, 张俊勃. 电力系统惯性的时空特性及分析方法[J/OL]. 中国电机工程学报; 1-9(2019-11-13) [2019-12-24]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.190084>.
ZENG Fanghong, ZHANG Junbo. The temporal and spatial characteristics of power system inertia and its analysis method[J/OL]. Proceedings of the CSEE; 1-9(2019-11-13) [2019-12-24]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.190084>.
- [24] INOUE T, TANIGUCHI H, IKEGUCHI Y, et al. Estimation of power system inertia constant and capacity of spinning-reserve support generators using measured frequency transients[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1):136-143.
- [25] CHASSIN D P, HUANG Z, DONNELLY M K, et al. Estimation of WECC system inertia using observed frequency transients[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2):1190-1192.
- [26] WALL P, GONZALEZ-LONGATT F, TERZIJA V. Estimation of generator inertia available during a disturbance[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting 2012. IEEE, 2012.
- [27] SUN M, FENG Y, WALL P, et al. On-line power system inertia calculation using wide area measurements[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 109:325-331.
- [28] 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.
- [29] ZOGRAFOS D, GHANDHARI M, ERIKSSON R. Power system inertia estimation: utilization of frequency and voltage response after a disturbance[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 161:52-60.
- [30] CAI G, WANG B, YANG D, et al. Inertia estimation based on observed electromechanical oscillation response for power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6):4291-4299.
- [31] ZHANG J, XU H. Online identification of power system equivalent inertia constant[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10):8098-8107.
- [32] YOU S, LIU Y, KOU G, et al. Non-invasive identification of inertia distribution change in high renewable systems using distribution level PMU[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1):1110-1112.
- [33] TUTTELBERG K, KILTER J, WILSON D, et al. Estimation of power system inertia from ambient wide area measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6):7249-7257.
- [34] 国家能源局华北监管局. 华北区域并网发电厂辅助服务管理实施细则(2019年修订版)[EB/OL]. (2019-09-26) [2019-12-24]. <http://hbj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=000000006c2a4364016d7de32f4d01f5>.
North China Energy Regulatory Bureau of National Energy Administration of the People's Republic of China. Implementation rules for the administration of auxiliary services for grid-connected power plants in north China (revised edition in 2019)[EB/OL]. (2019-09-26) [2019-12-24]. <http://hbj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=000000006c2a4364016d7de32f4d01f5>.
- [35] 国家能源局南方监管局. 广东调频辅助服务市场交易规则(试行)[EB/OL]. (2018-08-02) [2019-12-24]. http://120.31.132.37:8085/SCSERC_OUTER/temp/examples/upfileattach/71620229_wz_towaiwang.pdf.
South China Energy Regulatory Office of National Energy Administration. Guangdong frequency regulation auxiliary service market transaction rules (trial)[EB/OL]. (2018-08-02) [2019-12-24]. http://120.31.132.37:8085/SCSERC_OUTER/temp/examples/upfileattach/71620229_wz_towaiwang.pdf.
- [36] 徐春雷, 徐瑞, 仇晨光, 等. 发电机组一次调频在线测试与AGC性能考核系统设计[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3):1-6.
XU Chunlei, XU Rui, QIU Chenguang, et al. Evaluation system design of online test of primary frequency regulation and AGC performance for generator unit[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3):1-6.
- [37] 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.
GAO Lin, DAI Yiping, WANG Jiangfeng, et al. An online estimation method of primary frequency regulation parameters of generation units[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16):62-69.
- [38] 余绿绿. 基于DIGSILENT/PowerFactory的两区域互联电网AGC控制性能的概率评估方法[D]. 重庆:重庆大学, 2017.
YU Lulu. Probabilistic evaluation method of AGC control performance for two-area interconnected power grid based on DIG-

- SILENT/PowerFactory [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [39] 李丹,梁吉,孙荣富,等. 并网电厂管理考核系统中 AGC 调节性能补偿措施[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 107-111.
- LI Dan, LIANG Ji, SUN Rongfu, et al. Compensation strategies of AGC regulation performance in plants management and assessment system[J]. Automation of Electric Systems, 2010, 34(4): 107-111.
- [40] 刘克天,王晓茹,薄其滨. 基于广域量测的电力系统扰动后最低频率预测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2188-2195.
- LIU Ketian, WANG Xiaoru, BO Qibin. Minimum frequency prediction of power system after disturbance based on the WAMS data[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2188-2195.
- [41] 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): 78-86.
- 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): 78-86.
- [42] CANEVESE S, IARIA A, RAPIZZA M. Impact of fast primary regulation and synthetic inertia on grid frequency control [C]// IEEE Pes Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. IEEE, 2018.
- [43] VOROBEV P, GREENWOOD D M, BELL J H, et al. Deadbands, droop and inertia impact on power system frequency distribution[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3098-3108.

作者简介:



陈雪梅

陈雪梅(1996),女,博士在读,研究方向为区域系统频率特性分析(E-mail: chenxm18@mails.tsinghua.edu.cn);

陆超(1977),男,博士,副教授,博士生导师,研究方向为电力系统稳定分析与控制;

韩英铎(1938),男,博士,教授,博士生导师,中国工程院院士,研究方向为电力系统分析与控制、电力电子与柔性输电技术。

Review of power system frequency problems and frequency dynamic characteristics

CHEN Xuemei, LU Chao, HAN Yingduo

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The development of contemporary electrical power system causes the frequency characteristics more intricate and makes frequency stability more significant. Therefore, power system frequency problems is more and more significant, research on system frequency characteristics emerge and are applied to make system work more securely and steadily. Firstly, it reviews the process and causes of domestic and overseas frequency events in recent years from perspective of frequency dynamic characteristics. Then, combined with the characteristics of modern power system, the impacts on the frequency characteristics of large-scale power electronic interface are analyzed from multiple perspectives. After that, utilizing the single machine model to analyze the influence of generator parameters on multiple interactions of power system frequency dynamics, and summarize the related research and application of system inertia estimation, frequency regulation performance and frequency dynamic characteristics monitoring. Finally, some problems and directions worthy of exploration and research in the field of system frequency characteristics are proposed.

Keywords: frequency dynamics; frequency regulation; power-electronic-interfaced devices; inertia estimation; frequency regulation performance monitoring

(编辑 钱悦)