

风电与火电机组的一次调频技术分析及比较

郑 重,杨振勇,李卫华

(华北电力科学研究院有限责任公司,北京 100045)

摘要: 介绍了风电与火电机组常规的功率控制方法,分析及比较了其系统结构及控制层面的异同点;在此基础上,结合目前最新的风电与火电机组一次调频技术要求,分别从快速性和持续性 2 个方面系统性地总结和评价了现有的各种一次调频技术,从本质上揭示了风电实现一次调频的关键在于机-电协调控制;分别从单机机组、风电场级和电力系统 3 个层面对风电一次调频技术未来的发展方向进行了展望。

关键词: 风电; 火电; 虚拟同步发电机; 一次调频; 降载运行; 桨距角控制; 电力系统; 频率稳定性

中图分类号: TM 614;TM 761;TM 611 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.013

0 引言

近年来,随着以风电为代表的新能源发电系统装机容量不断增加,其自身有功出力的随机性和波动性已显著影响到电网频率的稳定性^[1-3]。电力系统的频率控制方式按照时间尺度和控制目标的不同,一般可分为一次调频、二次调频和三次调频^[4]。其中,一次调频与频率稳定性密切相关,其主要作用是当电网频率发生变化时使在网机组的负荷能在允许的范围内进行快速调整,以弥补电网的负荷缺额,进而确保电网频率的稳定^[5]。

为确保电网在大规模间歇式电源接入后能安全稳定运行,2008 年以来全国各区域电监局相继出台了《发电厂并网运行管理实施细则》和《并网发电厂辅助服务管理实施细则》(简称《两个细则》)^[6-8],对充当调频主力的火电机组的一次调频性能提出了更高要求。然而,2012 年以来随着火电机组环保减排和增容改造的大力推进,其锅炉燃烧系统和汽机通流系统的性能发生变化,对火电机组一次调频功能产生了一定程度的弱化^[9]。在此背景下,实际中因系统一次调频功能欠缺或不足而导致的电网频率波动事故时有发生。如 2015 年 9 月 19 日,雷暴天气导致锦苏直流双极闭锁,华东电网的频率近十年来首次跌破 49.8 Hz,达到 49.56 Hz。由此反映出当前仅靠传统火电机组的调频能力已无法完全满足维持电网频率稳定的需求,必须要求风电等新能源机组自身具备类似火电机组的频率响应特性和调频控制能力。

目前,商业化风电机组多采用双馈式感应发电机 DFIG(Doubly-Fed Induction Generator)^[10]或永磁同步发电机 PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator)^[11],其均以电力电子装置(主要是变频器)为并网接口实现机组的变速恒频 VSCF(Variable Speed Constant Frequency)运行,这不仅能捕获更多

的风能而且可以进行灵活的有功和无功功率调节。然而,也正是由于采用变频器控制减弱了与电网的耦合特性^[12],降低了系统惯量^[13]和过载能力^[14-15],当电网频率受到扰动时风电机组不具备传统采用同步发电机直接并网的火电机组固有的调频能力。与此同时,常规工况下风电机组多采用最大功率点跟踪 MPPT(Maximum Power Point Tracking)^[16]的控制方式,也并无参与电网一次调频的控制能力。

鉴于国内外专家和学者对火电机组一次调频问题的研究开展较早且取得了大量的成果,而风电机组虚拟同步发电机^[17-18]技术推广亦是大势所趋,因此,本文旨在借助火电机组一次调频相关的研究经验,通过分析及比较从本质上揭示风电机组实现一次调频功能的关键,并对现有的风电机组参与电网一次调频的控制技术进行总结,目的是为该问题的深入研究提供一定的参考。介绍了风电与火电机组常规的功率控制方法,给出了 2 类系统结构和控制层面的异同点;在此基础上,结合风电与火电机组一次调频的技术要求,分别从快速性和持续性 2 个方面系统地分析比较了 2 类系统现有的一次调频控制策略;分别从单机机组、风电场级和电力系统 3 个层面对风电一次调频技术未来的发展方向进行了展望。

1 风电与火电机组的常规功率控制方法

一次调频功能作为发电机组自身弥补电网负荷缺额的一种功率调整手段,其实现需基于机组常规工况下的功率控制。因此,在讨论风电与火电机组的一次调频控制策略之前,有必要分析比较这 2 类系统的常规功率控制方法。

1.1 火电机组的协调控制机理

火电机组协调控制系统 CCS(Coordinated Control System)是将锅炉与汽轮机作为一个单元整体来进行控制,通过协调两者的运行,确保机组快速稳定地满足负荷变化的需求,并保证机组自身的安全稳定运

行^[19]。按照机炉控制目标的不同,CCS 可分为炉跟机 BF(Boiler Follow)和机跟炉 TF(Turbine Follow)2 种方式,实际中由于 BF 方式充分利用了锅炉蓄热,能够快速响应机组负荷指令的变化^[20],因而得到了广泛应用。

火电机组 CCS 示意图如图 1 所示。BF-CCS 方式下汽轮机控制输出功率以满足机组负荷变化的需求,锅炉控制主汽压以保证机组的安全稳定运行。当负荷指令 N_0 变化时,汽轮机主控制调门开度 μ_T 改变蒸汽流量进而调整发电机输出功率 N_E 使其与负荷指令一致;调门开度 μ_T 改变引起的主汽压力 P_T 变化由锅炉主控响应并通过控制锅炉燃烧率(煤/水) μ_B 改变锅炉出力以适应负荷控制需求,从而达到能量平衡。目前火电机组协调控制研究中常使用“双入双出耦合”的广义等效模型进行被控对象建模^[21],具体如图 2 所示,输入为汽轮机调门开度 μ_T 和锅炉燃烧率 μ_B ,输出为机组功率和主汽压力。

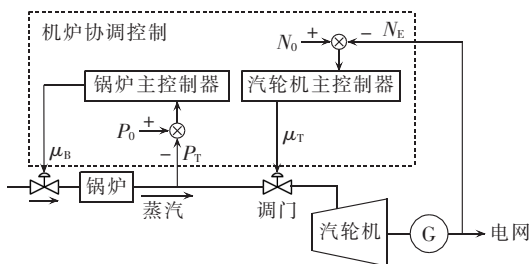


图 1 火电机组 CCS 示意图

Fig.1 Schematic diagram of CCS for thermal power unit

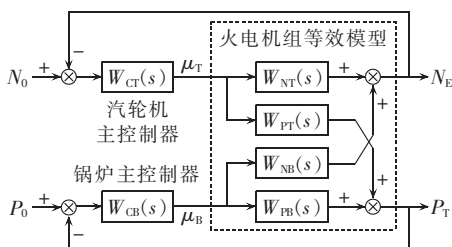


图 2 BF-CCS 原理框图

Fig.2 Principle block diagram of BF-CCS

1.2 风电机组的 MPPT 控制机理

风电机组系统结构示意图如图 3 所示^[22],风电机组主要由风力机、发电机、机械结构以及控制系统组成。

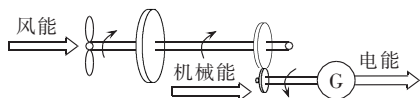


图 3 风电系统结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of wind power generation system

转换为机械能。为了尽可能提高风力机风能转换效率并保证风力机输出功率平稳,风力机需进行桨距调整^[23-24]。变桨距调节技术的主要优点是叶片桨距角可以随风速的大小进行自动调节,能够尽可能多地捕获风能,提高发电效率。

对于某一固定桨距角,存在唯一的风能利用系数最大值。当风速一定、风力机转速不同时其输出机械功率不同,但始终存在一个最佳转速,使得风力机输出功率最大(风能利用系数取得最大值),这就是最大风能捕获原理。不同风速下的最佳转速与风力机最大输出功率之间的对应关系可构成风力机的最大输出功率曲线,风电机组常规的 MPPT 控制目标是当风速变化时,确保系统能始终工作在最大输出功率曲线上。

作为风电机组能量转换的输出端,发电机及其控制系统的功能是将机械能转换为电能。风力机配备不同类型的发电机,并辅之以相应的电力电子装置配合发电机进行功率控制,可构成形式多样的风电机组。目前风电机组的发电机多采用 DFIG 和 PMSG,原因是其可按照 MPPT 的控制要求,在风速变化的情况下实时地调整风力机转速,使之始终运行在最佳转速上,即实现 VSCF 发电方式,从而提高了机组的发电效率。

根据发电机输出功率控制手段的不同,MPPT 有若干典型的控制实现方法,其中功率信号反馈 PSF (Power Signal Feedback)^[22]法由于无需测量风速且输出功率脉动较小,在实际中应用较广,其原理及控制系统示意图分别如图 4 和图 5 所示。假定 P_m 为风力机在当前风速下的最大输出机械功率, ω_1 为风力机当前转速,PSF 控制方法可在风力机最大输出功率曲线上选取 P_1 作为发电机输出电功率的给定,由于 P_1

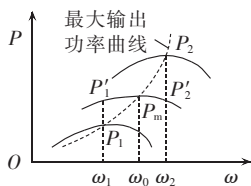


图 4 PSF 控制原理

Fig.4 Principle of power signal feedback control

小于当前风速下风力机实际输出的机械功率 P'_1 , 转速将从 ω_1 加速到 ω_0 , 系统最终稳定运行于最佳转速,即实现了 MPPT。同理,当风力机转速为 ω_2 时,通过 PSF 控制,转速将降低并最终稳定在 ω_0 。

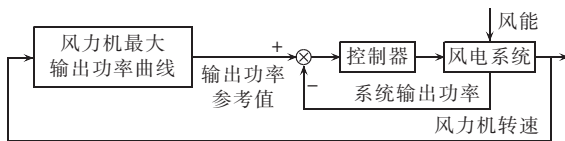


图 5 PSF-MPPT 控制示意图

Fig.5 Schematic diagram of PSF-MPPT control

1.3 风电与火电的对比

基于上述介绍,风电与火电机组在系统结构和控

从能量转换的角度看,风力机的功能是将风能

制方法层面的异同点如图 6 所示。

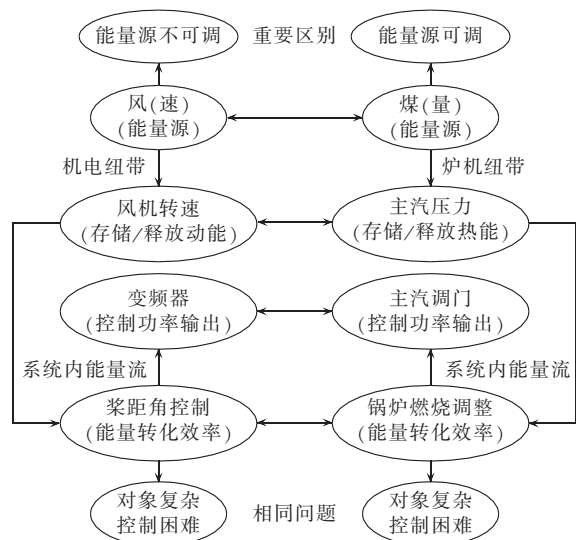


图 6 风电与火电机组的对比
Fig.6 Comparison between wind power and thermal power units

a. 相同点：系统结构层面，两者均为慢系统+快系统的组成方式，其中慢系统（风力机/锅炉）负责系统能量流输入端的转化，而快系统（发电机/汽轮机）则负责系统输出能量的控制；控制层面，两者的慢系统和快系统之间均需依靠一个重要的纽带（风机转速/主汽压力）进行信息传递和控制协调。对于控制难度而言均是慢系统大于快系统，原因在于慢系统控制（桨距角控制/锅炉燃烧调整）的对象复杂（多变量/非线性/强耦合），而快系统控制的执行机构（变频器/主汽调门）动作灵敏且响应快速。

b. 不同点：火电机组的能量源可调（燃料量可增减）而风电机组的能量源不可调（风速无法人为改变），对于需要在网机组能在网频发生变化时快速进行调整的一次调频功能而言，这无疑成为了风电机组的实现瓶颈，下文第 3 节将对此问题进行具体分析。

2 风电与火电机组的一次调频技术要求

以 2008 年华北电监局率先发布《两个细则》为标志，火电机组的一次调频性能正式纳入电网对发电厂的严格监管和经济考核范围内，2013 年国家标准《火力发电机组一次调频试验及性能验收导则》^[25] 的正式发布表征火电机组一次调频的技术要求和实现方法已趋于成熟。相比之下，风电机组的一次调频问题则是因近年来大规模间歇式电源并网后电网频率波动事故频发而凸显并引起重视。同时，伴随着虚拟同步发电机概念的提出和发展，风电等新能源机组参与电网一次调频也具备了可行性和技术支撑。在此背景下，国家电网公司于 2016 年起草了《风电机组虚拟同步发电机技术要求和试验方法》企业标

准，其中首次针对并网风电机组的一次调频功能提出了具体的指标要求。

鉴于风电机组一次调频问题的提出及相应技术规范制定均借鉴了火电机组一次调频研究的经验，因而风电与火电机组的一次调频技术要求中具体的量化考核指标虽不尽相同，但均从速度变动率、调频死区、动态指标和静态指标 4 个方面进行了规定，如表 1 所示。

表 1 风电与火电机组一次调频技术指标要求对比
Table 1 Comparison of primary frequency control technology requirements between wind power and thermal power units

一次调频技术指标	风电机组	火电机组
速度变动率	5%~20%	3%~6%
调频死区	±0.03 Hz	±0.03 Hz
动态指标	响应时间≤3 s	响应时间<3 s
	达到 90% 目标调频负荷时间≤12 s	达到 75% 目标调频负荷时间≤15 s
	稳定时间≤30 s	达到 90% 目标调频负荷时间≤30 s
		稳定时间<60 s
静态指标	向上最大调频量=10% 额定值	6% 额定值≤最大调频量≤10% 额定值
	向下最大调频量=20% 额定值	额定运行时间向上最大调频量≥3% 额定值
	有功出力>20% 额定值时要求参与一次调频	机组负荷变化下限>稳燃负荷

对于速度变动率这一表征机组参与电网一次调频能力大小的指标，其值过小会对机组自身变负荷过程的稳定性产生影响，而过大会对电网的作用偏小失去了调频意义。考虑到火电机组的单机容量一般远大于风电机组即一次调频能力更大，因而较之风电机组其速度变动率的要求值更小。在调频死区这一指标要求上，风电与火电机组保持一致。

除此之外，动态和静态指标分别针对机组实现一次调频功能关键的快速性和持续性两方面提出了要求。对于动态指标而言，因风电机组的控制执行机构主要由电力电子器件构成，其动作速度快于火电机组中由机械部件为主所构成的控制执行器，故在动态指标的快速性（响应时间、上升时间及稳定时间）要求方面，风电机组要高于火电机组；而对于静态指标而言，由于火电机组较之风电机组在调频蓄能方面的能力更强，故在静态指标的持续性（调频深度）要求方面，火电机组要高于风电机组。

综上所述，要实现机组的一次调频功能，需同时满足快速性和持续性两方面的技术要求，下文第 3 节将分别针对这 2 个方面对现有的风电与火电机组的一次调频控制策略进行介绍。

3 风电与火电机组的一次调频控制策略

由上文所述可知,依据控制目标可将现有的风电与火电机组的一次调频控制策略分为 2 个层面:实现快速性和实现持续性。

3.1 一次调频快速性的实现

若机组自身的蓄能(火电机组为锅炉蓄热、风电机组为转子动能)容量足够,则满足机组一次调频快速性指标的决定因素就在于其执行机构能否快速释放/吸收能量。

3.1.1 火电机组的综合阀位前馈控制方法

由图 2 可知,火电机组的输出功率由汽轮机主控制器进行调整,而具体的执行机构则是汽轮机调门,因此当电网频率发生变化需要机组相应地增加/减少其输出功率时,若要保证一次调频的快速性则需使得汽轮机调门对于网频的变化具备快开/快关的响应特性。

为此,目前火电机组在进行一次调频的功能设计时多采用如图 7 所示的综合阀位前馈控制方法^[6],即通过设计阀位增量函数(依据速度变动率),在汽轮机主控制器输出的综合阀位指令上直接叠加一个前馈量以响应网频的变化,然后经由火电机组的汽轮机数字电液控制系统 DEH (Digital Electric Hydraulic control system) 将综合阀位总指令依据各调节阀的特性曲线转换为各自相应的开度指令,进而利用锅炉蓄热快速地改变机组的输出功率。通过以上设计,火电机组由 DEH 侧功能实现了一次调频的快速性。

3.1.2 风电机组的转子动能控制方法

采用同步发电机直接并网的风电机组,由于其转子转速由电网频率决定,因而当网频发生偏移时发电机会相应地改变转子转速进而通过吸收或释放部分旋转动能的方式改变机组的有功输出,为电网提供频率支撑。相比于火电机组,虽然风电机组转速的可变范围更大,然而由于其采用变频器作为并网接口,使得发电机的转子转速与网频、机械功率与电磁功率均隔离开来,无法对网频的变化做出快速有效的响应。因此,需在图 5 所示的变频器常规 MPPT 控制的基础上额外增加转子动能控制环节^[5],使得风电机组能虚拟同步发电机的频率响应特性,以保证一次调频快速性的实现。

根据风电机组虚拟同步发电机侧重点的不同,可将转子动能控制方法分为惯性控制和下垂控制^[2-4],如图 8 所示。

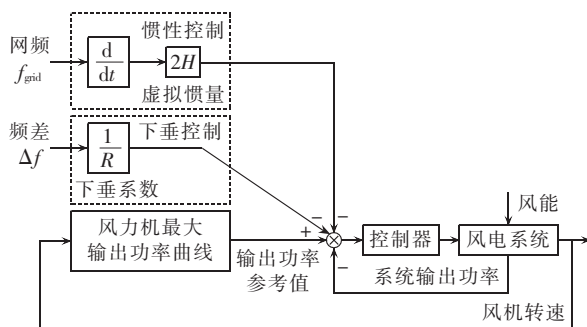


图 8 风电机组转子动能控制原理

Fig.8 Principle of rotor kinetic energy control for wind power

惯性控制虚拟的是同步发电机的自然调频能力即惯性,控制器的反馈信号为网频变化率,此方法在网频扰动发生的初始时刻可提供较大的有功支撑。文献[26]通过在 DFIG 变频器的控制中加入惯性控制模块,使得原本被隔离的 DFIG 转子转速和网频之间得以重新建立起对应关系,并通过检测网频的变化来调节 DFIG 的 MPPT 曲线,从而释放 DFIG 转子隐藏的动能以支撑网频的动态调整。文献[27]针对 PMSG,提出了频率-转速协调控制策略,通过对 PMSG 转速进行调节来参与调频,在增大系统惯性的同时可减少风电机组自身的转矩突变。

下垂控制虚拟的是 3.1.1 节中火电机组 DEH 侧的控制作用,以网频偏差作为反馈信号,可在网频的最高/低点附近发挥较强作用。鉴于风速较低时风电机组的转子动能调频裕度有限,采用统一的下垂控制系数容易导致机组因转速过低而切机,进而引发对网频的二次冲击^[28]。文献[29-30]对不同工况下的风电机组采用自适应的下垂控制,即通过设置可变的下垂系数充分挖掘不同风速下风电机组参与系统频率调节的能力。

考虑到惯性控制和下垂控制在控制效果上各有优劣,当设计风电机组的调频控制器时可同时采用^[31-33]。文献[34]通过仿真对 2 种方法进行了比较,指出采用惯性控制转速变化较小而采用下垂控制频率控制效果更好,并提出了将上述两者相结合的综合控制策略以协调频率和转速的变化。文献[35]跟踪网频的变化及机组的运行状态,通过设计参数控制算法实时修改控制参数,进而调整惯性控制和下垂控制所占的比重,为电网提供动态频率支撑。

需要强调的是,无论是火电机组的综合阀位前馈控制还是风电机组的转子动能控制,虽均可依靠释放/吸收能量在短时间内改变机组的输出功率,实现

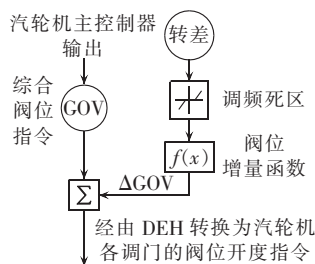


图 7 火电机组综合阀位前馈控制原理

Fig.7 Principle of composite valve position feedforward control for thermal power unit

一次调频的快速性,但同时也会因机组蓄能的骤变而影响到其安全稳定运行。例如,火电机组短时间内锅炉蓄热的大量释放会造成主汽压的迅速下降进而导致燃烧不稳,而风电机组转子动能大量转换为有功输出则会造成风机转速迅速下降进而导致转子失速。因此,采用上述控制策略仅能实现短时的功率支撑,无法为电网的功率失衡提供持续稳定的有功备用。

3.2 一次调频持续性的实现

结合上文分析及图 6 中的系统内能量流可知,仅依靠机组出口处(主汽调门/变频器)的功率调节是临时性的,要想获得持续稳定的调频能力,机组入口处能量源的及时进补显得至关重要。

3.2.1 火电机组协调控制策略的改进

为实现火电机组一次调频的持续性,需确保在图 7 中 DEH 侧综合阀位前馈控制动作时,CCS 侧能同时动作并及时调整其负荷指令,一方面使得负荷指令能满足一次调频发生后的调频负荷增量要求,另一方面通过锅炉主控改变能量源的需求量从而补偿一次调频动作对锅炉的影响。

为此,目前火电机组在进行 CCS 侧一次调频功能设计时多采用如图 9 所示的功率补偿控制方法^[36]。通过设计频率校正回路,当一次调频动作时,CCS 接收来自 DEH 的频差信号并经过死区判断和频差函数(依据速度变动率设计)处理后得到相应的一次调频负荷增量,此增量作为校正指令不经速率限制直接叠加在汽机主控制器的设定值处,从而保证了 CCS 侧与 DEH 侧一次调频响应的一致性。

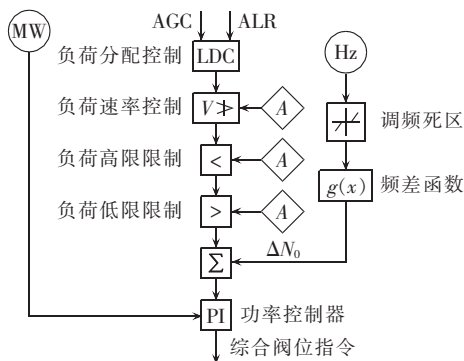


图 9 火电机组 CCS 功率补偿控制原理

Fig.9 Principle of power compensation control for thermal power unit CCS

3.2.2 风电机组的备用功率控制方法

相比于火电机组,风电机组的过载能力较弱,因此对于自身能量源不可调且运行于 MPPT 工况下的风电机组而言,其显然不具备表 1 中所要求的向上调频能力。为此,需要通过增加额外的备用功率控制环节使得风电机组工作在降载运行状态^[37],即放弃 MPPT 以确保当网频降低时向上一级调频的持续性。

由图 6 可知,风速一定的情况下,风电机组的降载运行可通过控制风机转速或桨距角来实现,目前风电机组主要的备用功率控制方法可据此分为 2 类,即超速法和变桨法,如图 10 所示。

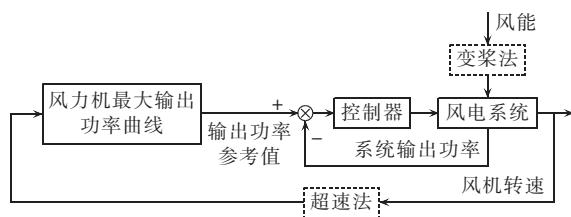


图 10 风电备用功率控制原理

Fig.10 Principle of reserve power control for wind power

借助图 4,假定 P_2 为风力机在当前风速下的最大输出机械功率,超速法的思路是通过人为地控制让风力机的运行转速大于其最佳转速 ω_2 ,从而将一部分有功输出转化为旋转动能加以储备;变桨法的思路则是让风力机叶片偏离其最优桨距角,使得风力机输出功率由 P_2 降为 P'_2 从而具备一定的备用功率。一般而言,为防止转子超速,超速法仅适用于额定风速以下的工况,而变桨法可实现全风速下风电机组的功率调节。但由于变桨法依赖于机械执行机构,一方面响应速度慢于超速法的转速调节,另一方面桨距角的频繁变化也会加剧机械磨损,因此实际中常综合采用超速法和变桨法。文献[38]根据不同的风速条件并基于分段控制的思想,提出在低风速时风电机组作为旋转备用电机运行,在中风速时根据卸负荷最佳功率提取曲线运行,在高风速时采用超速法或变桨法运行。文献[39]基于优先使用超速法的原则,提出在低风速时采用超速法,在中风速时综合采用超速法和变桨法,在高风速时采用变桨法。文献[40]进一步指出高风速下风电机组仅依靠桨距角调节有功出力时的动态过渡过程要比中低风速下同时调节转速和桨距角时快速。文献[41]考虑了运行经济性,提出 DFIG 只在高风速时综合使用超速法和变桨法参与调频,并基于网频质量改善要求和 DFIG 自身的调频能力,对风电机组的备用功率调频裕量进行了整定。

3.3 风电机组一次调频功能实现的关键

综合上文所述,风电与火电机组一次调频控制策略的对比分析如表 2 所示,可以看到,较之火电机组,风电机组实现一次调频的方案更为灵活。文献[42]指出惯性控制仅能降低频率的突变量,在频率趋于稳定时几乎没有调频贡献,结合变桨法能取得持续稳定的调频效果。文献[43]提出将惯性控制和桨距角控制相结合的复合频率控制策略,通过 2 种方法的共同作用可降低网频的初始变化率和稳态偏差。文献[44]针对惯性+变桨的控制方案,提出可通过

表 2 风电与火电机组一次调频控制策略对比

Table 2 Comparison of primary frequency control strategies between wind power and thermal power units

机组类型	快速性实现		持续性实现		综合实现				
	控制方法	控制思路	控制方法	控制思路					
火电机组	综合阀位前馈控制	使汽轮机调门具备快开/快关响应特性	CCS 功率补偿控制	通过锅炉主控实现机组能量源的及时进补	综合阀位前馈控制+CCS 功率补偿控制				
风电机组	转子动能控制	惯性控制	虚拟火电机组的自然调频能力	备用功率控制	超速法	让风力机运行转速大于其最佳转速以将部分有功输出转为旋转动能储备	惯性+超速	惯性+变桨	下垂+超速
		下垂控制	虚拟火电机组 DEH 侧的控制作用		变桨法	让风力机叶片偏离其最优桨距角以减少其捕获的风能从而实现功率备用	下垂+变桨	惯性 & 下垂+超速	惯性 & 下垂+变桨
							惯性+超速 & 变桨	下垂+超速 & 变桨	惯性 & 下垂+超速 & 变桨

设定桨距静调差系数来整定风电机组的功频静特性从而进一步减小稳态频率偏差。文献[45]是采用惯性+超速的控制方案,提出了跟踪参考转速调节输出功率的方法,使得风机参与调频时能虚拟同步发电机的功频特性。文献[46]针对惯性+超速 & 变桨的方案,引入了参与因子的概念来衡量 DFIG 机组参与调频的能力,并基于工程中易于精确测量的输入量设计了 DFIG 的频率控制器。文献[47]针对下垂+超速 & 变桨的方案,提出了基于运行点转移轨迹优化的有功控制策略,可在实现机组一次调频功能的同时确保转速和桨距角的调整量最小,从而减轻机械疲劳,延长机组使用寿命。

由上述分析可知,对于风电和火电机组而言,要同时满足一次调频快速性和持续性两方面的技术要求,离不开机组内部慢系统与快系统之间的协调控制。风电与火电机组一次调频功能的实现方案如图 11 所示。快系统控制机组蓄能的释放/吸收以确保一次调频的快速性,而慢系统则辅之以机组入口处能量需求量的精确调整以保证一次调频的持续稳定。

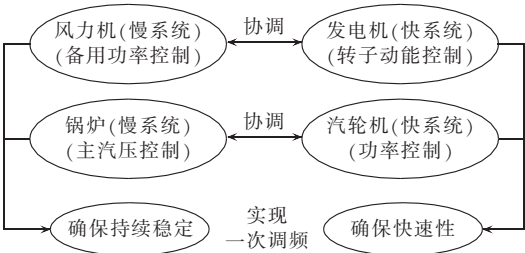


图 11 风电与火电机组一次调频的实现方案

Fig.11 Implementation schemes of primary frequency control for wind power and thermal power units

具体地,对于风电机组而言,其发电机转子动能控制执行机构变频器的建模及控制已较为成熟^[48],相比之下,风力机械子系统的桨距角备用功率控制则由于响应速度慢于电网频率的动态变化且被控对象复杂而显得更为困难。因此,综上所述,风电机组一次调频功能实现的关键在于机-电协调,而协调的技术瓶颈则在于风力机的桨距角控制。

4 风电一次调频技术展望

基于上述风电机组一次调频技术指标要求的分析及现有风电机组一次调频技术的总结,对风电一次调频技术未来的发展方向进行如下展望。

a. 单机机组层面风电的一次调频技术:变桨距控制技术的发展将是充分挖掘单机风电机组一次调频潜能的主要技术路线之一。针对风机桨距角这一复杂的强耦合、多变量非线性系统,如何获取被控对象的精确模型并通过有效的控制来尽量克服系统响应的滞后性将是决定单机风电机组一次调频能力上限的关键所在。

b. 风电场级层面风电的一次调频技术:相比火电机组而言,单机风电机组的容量较小,参与电网调频时更关注其以风电场为单位的功率外特性。一般地,对于由数十台单机风电机组所组成的风电场而言,各台单机机组之间会因所处的风速区及运行状态不同而导致其调频能力存在差异。因此,如何将整个风电场的调频出力合理地分配至各台机组的功率指令上,这就涉及场内各机组之间功率协调分配的问题。

无论是实现一次调频快速性的惯性控制和下垂控制,还是实现一次调频持续性的超速法,均会使风电机组在调频过程中的转速偏离其原始转速,而当网频扰动消失后,机组的转速会恢复至扰动发生前的MPPT工作点。因此,如何让风电场内的各台机组有序地退出调频模式以避免对网频造成二次冲击,这就涉及场内各机组之间转速恢复协调控制的问题。

对于上述 2 个问题,现有文献的思路主要是依据风速的不同对风电场内各台单机机组进行分组并按调频能力的大小进行排序,然后设计相应的算法来进行场内各机组间的调频功率分配^[49-51],或采用时序控制策略以实现场内机组的分批次退出调频^[52-54]。然而,由于实际中风速难以准确测量,此类方案不易于工程应用。因此,风电场内各单机机组之间的协调控制策略还有待进一步研究。

c. 电力系统层面风电的一次调频技术:对于当前国内电力系统的电源构成而言,常规火电机组依

然是调频主力,风电调频更多的是起辅助作用,从这个角度出发,风电场与火电机组之间同样存在协调控制的问题。现有文献的思路主要是设置顶端风火联合调度控制层,其作用在于实现风电场、火电机组及调度中心三者之间的信息通信^[55-57]。调度中心通过风火联合控制层可以在网频发生扰动需要风电参与调频时,传递火电机组的功率缺额信号给风电场,而在扰动消失风电场退出调频之前,可以提前告知火电机组增加其有功出力,从而充分发挥了风电调频响应快速和火电调频持久稳定的特性。然而,这种控制方法一方面依赖于风电场、火电机组及调度中心三者之间通信的实时性和可靠性,另一方面通信所需的设备建设将大幅增加风电场的投资和运营成本,更具工程实用性的通信机制和实现方案有待进一步探索。

为风电场集中配置储能设备以辅助实现一次调频的技术方案^[58-63]近年来备受国内外专家和学者的关注。备用功率控制方法虽然确保了风电机组一次调频的持续性,但其使得机组的运行工况偏离了MPPT工作点,降低了机组的运行效率,减少了发电量,不利于经济运行。在此情况下,具备快速响应特性的储能设备不仅能减少机组处于非MPPT点的工作时间,还可以平滑风电场的有功出力。目前常用的储能方式有飞轮储能、电池储能、超导磁储能、超级电容器储能等。显然,若仅依靠储能设备来实现风电场的一次调频,其需提供全部的调频备用容量,成本过高,因此,风电场与储能设备之间也存在协调控制的问题。如何协调好二者之间的关系,合理地配置储能设备的容量,兼顾经济性和安全稳定性的调频技术方案还有待进一步研究。

5 结语

本文从分析比较风电与火电机组这2类系统在结构和控制层面的异同点出发,对风电机组一次调频问题的产生、相关技术规范的要求系统地进行了分析和介绍,从本质上揭示了风电机组一次调频功能实现的关键在于机-电协调。分别从快速性和持续性2个方面对现有的各种风电一次调频技术进行总结和评价的同时,对其技术发展方向进行了展望,指出单机机组层面风电的一次调频技术重点在于变桨距控制;风电场级层面风电的一次调频技术重点在于场内各机组之间的功率协调分配和转速恢复协调控制;电力系统层面风电的一次调频技术重点在于风电场与火电机组之间以及风电场与储能设备之间的协调控制。

参考文献:

[1] 康忠健,辛士郎,仲崇山,等. 双馈风电场穿透功率增加对电力系

统稳定影响综述[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):94-99.

KANG Zhongjian,XIN Shilang,ZHONG Chongshan,et al. Impact of ride-through power increase of DFIG-based wind farm on power system stability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011,31(11):94-99.

[2] 刘巨,姚伟,文劲宇,等. 大规模风电参与系统频率调整的技术展望[J]. 电网技术,2014,38(3):638-646.

LIU Ju,YAO Wei,WEN Jinyu,et al. Prospect of technology for large-scale wind farm participating into power grid frequency regulation[J]. Power System Technology,2014,38(3):638-646.

[3] 唐西胜,苗福丰,齐智平,等. 风力发电的调频技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(25):4304-4314.

TANG Xisheng,MIAO Fufeng,QI Zhiping,et al. Survey on frequency control of wind power[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(25):4304-4314.

[4] 谷俊和,刘建平,江浩. 风电接入对系统频率影响及风电调频技术综述[J]. 现代电力,2015,32(1):46-51.

GU Junhe,LIU Jianping,JIANG Hao. Literature review on the influence of wind power on system frequency and frequency regulation technologies of wind power[J]. Modern Electric Power, 2015,32(1):46-51.

[5] 田汝冰,杨玉鹏,刘志武,等. 风电机组参与电网一次调频的控制策略研究[J]. 黑龙江电力,2015,37(1):42-48.

TIAN Rubing,YANG Yupeng,LIU Zhiwu,et al. Research on primary frequency control for power system with participation of wind turbines[J]. Heilongjiang Electric Power,2015,37(1):42-48.

[6] 杨振勇,李卫华,骆意. 火力发电机组一次调频问题研究[J]. 华北电力技术,2008(1):16-20.

YANG Zhenyong,LI Weihua,LUO Yi. Research on primary frequency for thermal power generating units[J]. North China Electric Power,2008(1):16-20.

[7] 康静秋,尹喜超. 电网两个细则实施下机组典型负荷波动分析[J]. 华北电力技术,2012(12):58-60.

KANG Jingqiu,YIN Xichao. Analysis on typical fluctuation power load under two regulations in power grid[J]. North China Electric Power,2012(12):58-60.

[8] 康静秋,杨振勇,李卫华. 电网“两个细则”条件下提高燃煤机组调峰性能的热控整体优化方案[J]. 华北电力技术,2015(1):58-64.

KANG Jingqiu,YANG Zhenyong,LI Weihua. Overall thermal control optimization scheme for improving performance of peak regulation of coal-fired units in grid “two rules” conditions[J]. North China Electric Power,2015(1):58-64.

[9] 郑重,李卫华,耿华,等. 火电厂辅机变频器低电压穿越技术综述[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):143-148.

ZHENG Zhong,LI Weihua,GENG Hua,et al. Review of LVRT technology for auxiliary equipment inverter of thermal power plant[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(12):143-148.

[10] 杨耕,郑重. 双馈型风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电力电子技术,2011,45(8):32-36.

YANG Geng,ZHENG Zhong. Review of low voltage ride-through technology for doubly-fed induction generator based wind energy conversion systems[J]. Power Electronics,2011,45(8):32-36.

[11] 耿华,许德伟,吴斌,等. 永磁直驱变速风电系统的控制及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报,2009,29(33):68-75.

- GENG Hua, XU Dewei, WU Bin, et al. Control and stability analysis for the permanent magnetic synchronous generator based direct driven variable speed wind energy conversion system [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(33): 68-75.
- [12] 郑重, 杨耕, 耿华. 电网故障下基于撬棒保护的双馈风电机组短路电流分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 7-15.
- ZHENG Zhong, YANG Geng, GENG Hua. Short-circuit current analysis for DFIG-based wind generation system with Crowbar protection under grid faults[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 7-15.
- [13] 奚鑫泽, 耿华, 杨耕. 含主动轴系扭振阻尼的并网双馈风电场惯量控制方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 136-144.
- XI Xinze, GENG Hua, YANG Geng. Inertia control of the grid connected doubly fed induction generator based wind farm with drive-train torsion active damping[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 136-144.
- [14] 郑重, 杨耕, 耿华. 配置 STATCOM 的 DFIG 风电场在不对称电网故障下的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 27-38.
- ZHENG Zhong, YANG Geng, GENG Hua. A control strategy for doubly-fed induction generator based wind farms equipped with STATCOM under asymmetrical grid fault situations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 27-38.
- [15] 郑重, 耿华, 杨耕. 新能源发电系统及网逆变器的高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1463-1472.
- ZHENG Zhong, GENG Hua, YANG Geng. High voltage ride-through control strategy of grid-connected inverter for renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1463-1472.
- [16] 耿华, 杨耕, 周伟松. 考虑风机动态的最大风能捕获策略[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 107-111.
- GENG Hua, YANG Geng, ZHOU Weisong. MPPT strategy considering wind turbine dynamics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 107-111.
- [17] ZHONG Q C, HORNIK T. Control of power inverters in renewable energy and smart grid integration[M]. New York, USA: Wiley-IEEE Press, 2012: 277-296.
- [18] 张兴, 朱德斌, 徐海珍. 分布式发电中的虚拟同步发电机技术[J]. 电源学报, 2012(3): 1-6.
- ZHANG Xing, ZHU Debin, XU Haizhen. Review of virtual synchronous generator technology in distributed generation[J]. Journal of Power Supply, 2012(3): 1-6.
- [19] 李卫华, 王玉山. 大型火电机组在 AGC 运行方式下的控制特性分析[J]. 电网技术, 2005, 29(18): 12-16.
- LI Weihua, WANG Yushan. Analysis on control characteristics of high capacity thermal power generating sets under AGC mode[J]. Power System Technology, 2005, 29(18): 12-16.
- [20] 梅得奇, 李卫华, 王军孝, 等. 600 MW 火电机组协调控制策略优化[J]. 热力发电, 2009, 38(5): 98-101.
- MEI Deqi, LI Weihua, WANG Junxiao, et al. The optimization strategy of coordinated control system for 600 MW thermal power plant[J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(5): 98-101.
- [21] 张雨飞. 超超临界火电机组热工控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 22-31.
- [22] 耿华. 风力发电系统能量优化问题的研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- GENG Hua. Research on energy optimization of wind generation system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.
- [23] GENG H, YANG G. Output power control for variable-speed variable-pitch wind generation systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 494-502.
- [24] 杨文韬, 耿华, 肖帅, 等. 大型风电机组的比例-积分-谐振独立变桨距控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 87-92.
- YANG Wentao, GENG Hua, XIAO Shuai, et al. PI-R individual pitch control for large-scale wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 87-92.
- [25] 李卫华, 杨振勇. 火力发电机组一次调频试验及性能验收导则: GB/T 30370—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [26] 李和明, 张祥宇, 王毅, 等. 基于功率跟踪优化的双馈风力发电机组虚拟惯性控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 32-39.
- LI Heming, ZHANG Xiangyu, WANG Yi, et al. Virtual inertia control of DFIG-based wind turbines based on the optimal power tracking[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 32-39.
- [27] 李立成, 叶林. 变风速下永磁直驱风电机组频率-转速协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 26-31.
- LI Licheng, YE Lin. Coordinated control of frequency and rotational speed for direct drive permanent magnet synchronous generator wind turbine at variable wind speeds[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 26-31.
- [28] 丁磊, 尹善耀, 王同晓, 等. 考虑惯性调频的双馈风电机组主动转速保护控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 29-34.
- DING Lei, YIN Shanyao, WANG Tongxiao, et al. Active rotor speed protection strategy for DFIG-based wind turbines with inertia control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 29-34.
- [29] CHANG-CHIEN L R, LIN W T, YIN Y C. Enhancing frequency response control by DFIGs in the high wind penetrated power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 710-718.
- [30] VIDYANANDAN K V, NILANJAN S. Primary frequency regulation by deloaded wind turbines using variable droop[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 837-846.
- [31] 曹军, 王虹富, 邱家驹. 变速恒频双馈风电机组频率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 78-82.
- CAO Jun, WANG Hongfu, QIU Jiaju. Frequency control strategy of variable-speed constant-frequency doubly-fed induction generator wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 78-82.
- [32] 薛迎成, 邵能灵, 刘立群, 等. 双馈风力发电机参与系统频率调节新方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2839-2845.
- XUE Yingcheng, TAI Nengling, LIU Liqun, et al. New method of system frequency regulation with Doubly Fed Induction Generator(DFIG)[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2839-2845.
- [33] 郭炜, 孔维君, 柳伟. 风电机组一次调频特性研究[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(4): 31-34.
- GUO Wei, KONG Weijun, LIU Wei. Research on primary frequency regulation characteristic of wind turbine[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(4): 31-34.
- [34] 邹贤求, 吴政球, 陈波, 等. 变速恒频双馈风电机组频率控制策略的改进[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(3): 63-68.
- ZOU Xianqiu, WU Zhengqiu, CHEN Bo, et al. Improved frequency control strategy for variable-speed constant-frequency doubly-fed induction generator wind turbines[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(3): 63-68.

- [35] 田新首,王伟胜,迟永宁,等. 基于双馈风电机组有效储能的变参数虚拟惯量控制[J]. 电力系统自动化,2015,39(5):20-26.
TIAN Xinshou,WANG Weisheng,CHI Yongning,et al. Variable parameter virtual inertia control based on effective energy storage of DFIG-based wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(5):20-26.
- [36] 杨振勇,陈贵星,尚勇. DEB 协调方式下一次调频功能实现与优化[J]. 华北电力技术,2007(1):38-40.
YANG Zhenyong,CHEN Guixing,SHANG Yong. Application and optimization for primary frequency control based on DEB[J]. North China Electric Power,2007(1):38-40.
- [37] 李超,王洪涛,韦仲康,等. 含大型风电场的弱同步电网协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):96-103.
LI Chao,WANG Hongtao,WEI Zhongkang,et al. Coordinated control of weakly-synchronized grid containing large wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):96-103.
- [38] 薛迎成,邵能灵,宋凯,等. 变速风力发电机提供调频备用容量研究[J]. 电力自动化设备,2010,30(8):75-80.
XUE Yingcheng,TAI Nengling,SONG Kai,et al. Variable-speed wind turbines provide primary reserve for frequency control[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(8):75-80.
- [39] 张昭遂,孙元章,李国杰,等. 超速与变桨协调的双馈风电机组频率控制[J]. 电力系统自动化,2011,35(17):20-25.
ZHANG Zhaosui,SUN Yuanzhang,LI Guojie,et al. Frequency regulation by doubly fed induction generator wind turbines based on coordinated overspeed control and pitch control[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(17):20-25.
- [40] 李生虎,朱国伟. 基于有功备用的风电机组一次调频能力及调频效果分析[J]. 电工电能新技术,2015,34(10):28-33.
LI Shenghu,ZHU Guowei. Capability and effect of primary frequency regulation by wind turbine generators with active power reserve[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2015,34(10):28-33.
- [41] 吴子双,于继来,彭喜云. 高风速段次优功率追踪方式的风电调频方法[J]. 电工技术学报,2013,28(5):112-119.
WU Zishuang,YU Jilai,PENG Xiyun. DFIG's frequency regulation method only for high wind speed with suboptimal power tracking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(5):112-119.
- [42] 方日升,温步赢,江岳文. 变速风力发电机组调频控制策略研究[J]. 电网与清洁能源,2014,30(4):40-46.
FANG Risheng,WEN Buying,JIANG Yuewen. Research on the frequency control strategy of variable speed wind turbines[J]. Power System and Clean Energy,2014,30(4):40-46.
- [43] 朱晓荣,赵猛,王毅. 双馈感应风力发电机组复合频率控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(8):20-24.
ZHU Xiaorong,ZHAO Meng,WANG Yi. Composite frequency control strategy of doubly-fed induction generator wind turbines[J]. Power System Protection and Control,2012,40(8):20-24.
- [44] 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.
- [45] 丁磊,尹善耀,王同晓,等. 结合超速备用和模拟惯性的双馈风机频率控制策略[J]. 电网技术,2015,39(9):2385-2391.
DING Lei,YIN Shanyao,WANG Tongxiao,et al. Integrated frequency control strategy of DFIGs based on virtual inertia and over-speed control[J]. Power System Technology,2015,39(9):2385-2391.
- [46] 田新首,迟永宁,汤海雁,等. 一种双馈风电机组频率控制器[J]. 广东电力,2016,29(6):43-49.
TIAN Xinshou,CHI Yongning,TANG Haiyan,et al. A kind of frequency controller for doubly-fed induction generators[J]. Guangdong Electric Power,2016,29(6):43-49.
- [47] 米增强,刘力卿,余洋,等. 限电弃风工况下双馈风电机组有功及调频控制策略[J]. 电工技术学报,2015,30(15):81-88.
MI Zengqiang,LIU Liqing,YU Yang,et al. The control strategy of active power and frequency regulation of DFIG under wind abandon condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(15):81-88.
- [48] TEODORESCU R,LISERRE M,RODRIGUEZ P. Grid converters for photovoltaic and wind power systems[M]. New York,USA: Wiley-IEEE Press,2011:205-236.
- [49] CHANG-CHIEN L R,YIN Y C. Strategies for operating wind power in a similar manner of conventional power plant[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(4):926-933.
- [50] 薛迎成,邵能灵,宋凯,等. 基于分层架构的风电场频率调节策略[J]. 华东电力,2010,38(3):402-407.
XUE Yingcheng,TAI Nengling,SONG Kai,et al. Frequency control strategy of wind farms based on hierarchical structure[J]. East China Electric Power,2010,38(3):402-407.
- [51] 范冠男,刘吉臻,孟洪民,等. 电网限负荷条件下风电场一次调频策略[J]. 电网技术,2016,40(7):2030-2037.
FAN Guannan,LIU Jizhen,MENG Hongmin,et al. Primary frequency control strategy for wind farms under output-restricted condition[J]. Power System Technology,2016,40(7):2030-2037.
- [52] 何成明,王洪涛,孙华东,等. 变速风电机组调频特性分析及风电场时序协同控制策略[J]. 电力系统自动化,2013,37(9):1-6.
HE Chengming,WANG Hongtao,SUN Huadong,et al. Analysis on frequency control characteristics of variable speed wind turbines and coordinated frequency control strategy of wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(9):1-6.
- [53] 陈宇航,王刚,侍乔明,等. 一种新型风电场虚拟惯量协同控制策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(5):27-33.
CHEN Yuhang,WANG Gang,SHI Qiaoming,et al. A new coordinated virtual inertia control strategy for wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(5):27-33.
- [54] 刘彬彬,杨健维,廖凯,等. 基于转子动能控制的双馈风电机组频率控制改进方案[J]. 电力系统自动化,2016,40(16):17-22.
LIU Binbin,YANG Jianwei,LIAO Kai,et al. Improved frequency control strategy for DFIG-based wind turbines based on rotor kinetic energy control[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(16):17-22.
- [55] 李灿,李超,康正,等. 含变速恒频风电场的电网频率协调控制策略[J]. 电网与清洁能源,2014,30(7):62-67.
LI Can,LI Chao,KANG Zheng,et al. Frequency coordinated control strategy of variable-speed constant-frequency wind farms in power grids[J]. Power System and Clean Energy,2014,30(7):62-67.
- [56] 隗露捷,王德林,李芸,等. 基于可变系数的双馈风电机组与同步

- 发电机协调调频策略[J]. 电力系统自动化,2017,41(2):94-100.
- WEI Linjie,WANG Delin,LI Yun,et al. Variable coefficient based coordinated frequency modulation strategy between DFIG-based wind turbine and synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(2):94-100.
- [57] 刘吉臻,姚琦,柳玉,等. 风火联合调度的风电场一次调频控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(12):3462-3469.
- LIU Jizhen,YAO Qi,LIU Yu,et al. Wind farm primary frequency control strategy based on wind & thermal power joint control[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(12):3462-3469.
- [58] 柳伟,顾伟,孙蓉,等. DFIG-SMES 互补系统一次调频控制[J]. 电工技术学报,2012,27(9):108-116.
- LIU Wei,GU Wei,SUN Rong,et al. Primary frequency control of doubly fed induction generator-superconducting magnetic energy storage complementary system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(9):108-116.
- [59] 刘世林,文劲宇,高文根,等. 基于飞轮储能的并网风电功率综合调控策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):34-39.
- LIU Shilin,WEN Jinyu,GAO Wengen,et al. FESS-based comprehensive control of grid-connecting wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):34-39.
- [60] 苗福丰,唐西胜,齐智平. 储能参与风电一次调频的容量优化[J]. 电工电能新技术,2016,35(4):23-29.
- MIAO Fufeng,TANG Xisheng,QI Zhiping. Capacity optimization of energy storage participating to wind plant primary frequency regulation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2016,35(4):23-29.
- [61] 李欣然,黄际元,陈远扬,等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(7):145-153.
- LI Xinran,HUANG Jiyuan,CHEN Yuanyang,et al. Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation[J]. Power System Protection and Control,2016,44(7):145-153.
- [62] 胡泽春,夏睿,吴林林,等. 考虑储能参与调频的风储联合运行优化策略[J]. 电网技术,2016,40(8):2251-2257.
- HU Zechun,XIA Rui,WU Linlin,et al. Joint operation optimization of wind-storage union with energy storage participating frequency regulation[J]. Power System Technology,2016,40(8):2251-2257.
- [63] 李本新,韩学山,刘国静,等. 风电与储能系统互补下的火电机组组合[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):32-37.
- LI Benxin,HAN Xueshan,LIU Guojing,et al. Thermal unit commitment with complementary wind power and energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(7):32-37.

作者简介:



郑 重

郑 重(1986—),男,湖北洪湖人,高级工程师,博士,主要研究方向为风电机组的并网及电网故障穿越技术、火电机组的优化控制技术(E-mail:zhengz.thu@gmail.com);

杨振勇(1977—),男,黑龙江佳木斯人,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为火电机组的协调控制和智能控制技术;

李卫华(1967—),男,北京人,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为火电机组的协调控制和智能控制技术。

Analysis and comparison of primary frequency control technology for wind power and thermal power unit

ZHENG Zhong,YANG Zhenyong,LI Weihua

(North China Electric Power Research Institute Co.,Ltd.,Beijing 100045,China)

Abstract: Conventional power control methods of wind power and thermal power unit are introduced,and the similarities and differences in aspects of system structure and control between wind power and thermal power unit are analyzed and compared. On this basis,the latest technical rules of primary frequency control and the existing primary frequency control technologies are systematically summarized and evaluated from two aspects of rapidity and sustainability respectively. Meanwhile,it can be concluded that the machinery-electricity coordinate control represents the key of primary frequency control for wind power. The future promising direction of primary frequency control technologies for wind power is prospected in three parts: single unit,wind farm,and power system.

Key words: wind power; thermal power; virtual synchronous generator; primary frequency control; de-loading operation; pitch angle control; electric power systems; frequency stability