

火电机组一次调频技术研究进展综述

袁春峰¹, 刘锴慧², 张帆², 杨浩², 孙晨阳³, 魏书洲⁴, 王金星^{5,✉}

(1. 国电电力发展股份有限公司, 北京 100020; 2. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 河北 保定 071003;
3. 河北师范大学 中燃工学院, 河北 石家庄 050024; 4. 三河发电有限责任公司, 河北 廊坊 065201;
5. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

摘要: [目的] 火电机组的一次调频技术是保障电网安全稳定运行的重要内容。[方法] 文章评述了当前火电机组一次调频技术、辅助一次调频技术、耦合调频控制策略以及一次调频技术潜在的发展方向。[结果] 对于机组一次调频技术主要包括调节阀预节流、可调整回热抽汽调频和凝结水节流调频, 其中以凝结水节流调频技术为主; 辅助一次调频技术主要基于飞轮储能和蓄电池响应速率快的特点满足机组输入输出需求, 并对耦合辅助调频技术的焦点和难点进行了分析; 基于调频技术的系统建模及控制策略研究能够使机组参数间的匹配性更为优化。[结论] 最后, 对比了近年来一次调频技术的应用情况, 认为飞轮储能一次调频和滑压运行优化将是其重点发展方向。

关键词: 一次调频; 火电机组; 辅助技术; 系统建模; 控制策略; 飞轮储能; 滑压运行

中图分类号: TM611; TM315 文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)03-0001-08

开放科学(资源服务)二维码:



Review on the Research Progress of Primary Frequency Modulation Technology for Thermal Power Units

YUAN Chunfeng¹, LIU Kaihui², ZHANG Fan², YANG Hao², SUN Chenyang³, WEI Shuzhou⁴, WANG Jinxing^{5,✉}

(1. Guodian Electric Power Development Co., Ltd., Beijing 100020, China; 2. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China; 3. College of Zhongran, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 4. SanHe Power Plant Ltd., CHN Energy, Langfang 065201, Hebei, China;
5. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: [Introduction] The primary frequency modulation technology of thermal power units has been considered essential to ensure the power grid's safe and stable operation. [Method] The current primary frequency modulation technology, the auxiliary primary frequency modulation technology, the coupled frequency modulation control strategy, and the potential development direction of primary frequency modulation technology were reviewed. [Result] The results show that the primary frequency modulation technology for the unit mainly includes regulating valve pre-throttling, adjustable regenerative steam extraction frequency modulation, and condensate water throttling frequency modulation. Among them, the condensate water throttling frequency modulation technology should be the main mode. Auxiliary primary frequency modulation technology is mainly based on the fast-response rate characteristics of flywheel energy storage and battery to meet the unit input and output requirements. The focus and difficulty of coupled auxiliary frequency modulation technology are then analyzed. The system modeling and control strategy research based on frequency modulation technology can optimize the matching between unit parameters. [Conclusion] Thus, the application status of primary frequency modulation technology in recent years is compared, and it is considered that flywheel energy storage primary frequency modulation and sliding pressure operation optimization will be the key development direction.

Key words: primary frequency modulation; thermal power units; assistive technology; system modeling; control strategy; flywheel

收稿日期: 2021-11-19 修回日期: 2021-12-03

基金项目: 河北省自然科学基金项目“固体垃圾调质抑制化学链燃烧生成二噁英的作用机制”(E2020502007); 中央高校基金项目“铁基化学链燃烧抑制二噁英生成机制研究”(2020MS103)

energy storage; sliding pressure operation

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

随着世界碳减排任务的紧迫,中国作为全球二氧化碳排放大国,未来 30~40 年中国二氧化碳排放计划将备受关注。为此,中国政府已提出了“双碳”战略规划^[1]。

为实现这一阶段性战略,大力发展新能源电力已成为重要的发展内容,然而新能源电力的不确定性、波动性导致了电网侧的不稳定。维持频率的稳定是保障电网运行稳定的重要方面。电力系统的一次调频主要是通过电网机组负荷的快速调整以达到电网频率发生变化时的电网频率稳定^[2]。由于我国电力结构的调整,电力供求关系呈现出“火电利用小时整体下降”“峰谷差异大”“自动发电控制(Automatic Generator Control, AGC)调整频繁”等问题^[3],因此增加了对火电机组负荷调频的要求。火电机组所呈现的高维、非线性控制特性,以及汽轮机阀门流量特性等因素对于系统至关重要,决定着机组和电网的一次调频性能^[4]。火电机组一次调频控制是一项综合性的控制过程,涉及的技术指标比较多^[5],只有与各方面做到有效协调,才能够达到理想的效果。一次调频控制功能与机组 AGC 的协调有密切的联系,一旦未能有效协调,机组一次调频功能就无法运作,严重影响电网频率的稳定性。当汽轮机阀门流量特性和重叠度设置不合适时,数据处理设备(Data Handling Equipment, DHE)侧的一次调频效果就无法达到预期要求,调频效果受到严重影响^[6]。此外,主蒸汽压力的偏大和低负荷工况下压力的偏低均会直接影响一次调频效果^[7]。李强等^[8]以 700 MW 机组为例进行了控制系统优化,实现了综合调频性能的显著提高。因此,在考虑机组特征参数的前提下,进一步优化一次调频控制策略是提高调频质量的重要方面^[9]。

本文将结合当前火电机组一次调频技术的原理、特点及多种一次调频技术的控制策略等方面进行系统的介绍和分析汇总,期望为后续的火电机组调频研究提供参考。

1 机组一次调频技术

目前机组一次调频技术可主要分为调节阀预节流、可调整回热抽汽调频和凝结水节流调频。例如,余海鹏等^[10]采用了预节流调频技术,以超超临界汽轮机为研究对象,重点分析了全滑压运行方式,结果发现预先适当减小调节阀开度,能够提高机组的一次调频能力。杜洋洋等^[11]采用可调整回热抽汽调频对 1 000 MW 燃煤火电机组的省煤器蓄热的利用过程展开研究,结果发现该技术可通过增加回热抽汽提高机组的经济性,但在调频增减负荷中由于附加给水加热器抽汽量而导致装置效率的降低,彼此抵消后的效果显示其并不能明显地影响机组的经济性。刘吉臻等^[12]采用了凝结水节流调频对 1 000 MW 超超临界机组的凝结水节流蓄能系数展开了计算,结果发现凝结水节流具有更快的响应速度,可通过调节凝结水流量达到精准节流蓄能,与此同时,通过环境机炉侧的控制压力,使动态控制效果更好。图 1 呈现了上述一次调频的技术原理。

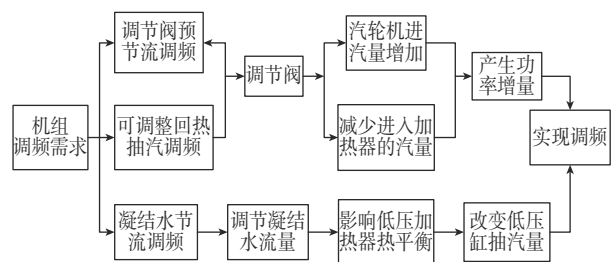


图 1 三种机组调频技术原理图

Fig. 1 Schematic diagram of frequency modulation technology of three sets

1.1 调节阀预节流

调节阀预节流是指工作条件下调节阀始终维持一定的节流状态,当机组有调频需要时汽轮机进汽量会因调节阀的瞬时打开而快速增加,并在汽轮机内快速膨胀做功,进而通过增加电功率达到响应一次调频指令^[13]。对于各调节阀基本维持全开状态的节流配汽机组,此时变负荷一般有两种措施:一是汽轮机的负荷主要由主蒸汽压力调控汽轮机进汽量来

完成,通过数据控制信号发命令锅炉给水泵改变转速来实现负荷的改变,但响应时间稍慢;二是采用改变多个调节阀开度以实现调控汽轮机进汽量及焓降的方法,达到调节汽轮机负荷的效果^[14]。

1.2 可调整回热抽汽调频

可调整回热抽汽技术的工作原理为通过调节阀实现加热器的汽量减少,进而更多的蒸汽进入汽轮机做功,可满足机组增加出力的需求,实现机组调频。在实际生产中,机组通过调节抽汽阀可达到减少抽汽量的目的,实现负荷调节需求。在此基础上,通过调节回热抽汽的压力和温度等参数,可达到对给水温度波动性“过滤”的作用^[13]。

1.3 凝结水节流调频

凝结水节流调频是指在凝汽器和除氧器允许水位条件下,通过除氧器的上水阀对凝结水流量进行调节,进而可通过控制低压缸抽汽量的改变而满足机组负荷要求,达到调频的目的。需要指出的是,凝结水的节流会导致除氧器水位的下降,受其尺寸限制,过度的节流会带来过低的水位,进而造成水泵连锁停止。因此,如何实现定量调节凝结水节流系统以及精准控制其蓄能成为了待解决的核心问题^[12]。

综上所述,三种调频技术的特点见表1。其中调节阀预节流操作简单,但受调控范围约束以及安全性差;可调整回热抽汽调频安全性高,但调频能力受大频差影响;凝结水节流调频响应速度快,但受除氧器蓄热量、凝结水流量限制。

表1 三种一次调频技术对比
Tab. 1 Comparison of three FM techniques

一次调频技术	调频特性	缺点	优点
调节阀 预节流	通过电功率升高 实现调频 ^[13]	①受调控范围约束 ②安全性差 ^[11]	操作简单
可调整 回热抽汽	通过产生功率增 量实现调频 ^[13]	①受大频差影响 ②负荷降低,机组 蓄热量下降 ^[15]	①安全性较高 ②负荷可快速提升 ^[11]
凝结水 节流	改变低压缸抽汽 量,进而改变机组 负荷 ^[12]	受除氧器蓄热量、 凝结水流量限制 ^[12]	①响应速度快 ②可精确控制节流 蓄能利用 ^[12] ③安全性经济性高 ^[15]

2 辅助一次调频技术

本文所述的辅助一次调频技术主要耦合储能技

术的辅助调频,其中储能技术可分为电化学储能、电磁储能和机械储能等形式^[16],其中超级电容器(电磁储能)、蓄电池储能(电化学储能)、抽水蓄能和飞轮储能(机械储能)技术均可适用于辅助一次调频中。抽水蓄能技术已经较为成熟且得到应用广泛,但地理环境因素制约了它进一步的发展,其他新型储能辅助调频技术仍处于示范阶段。

2.1 蓄电池储能调频

蓄电池储能调频是指通过电能与化学能之间的转换达到对电能的充放效果。其中蓄电池可分为铅酸蓄电池、锂离子电池、液流电池和钠硫电池。蓄电池储能系统主要由电池系统、电池管理系统(Battery Management System, BMS)、功率变换系统(Power Conversion System, PCS)以及监控系统四部分组成。蓄电池储能系统可通过迅速弥补功率缺额或吸收有功功率达到电网频率稳定的效果。在火电机组进行一次调频时,电池储能系统可通过快速辅助调频而避免机组到达自身调频的死区,同时使频率迅速恢复到正常范围。为此,蓄电池储能系统能够大大降低火电机组的调节需求,进而减少相应的设备磨损,同时弥补机组响应延迟所引发的频率波动^[17-18]。蓄电池储能目前存在的不足主要包括造价较高^[19]以及自身储能容量有限等,现阶段锂离子电池储能辅助调频应用较为广泛。其他电池如铅蓄电池容易对环境造成污染,钠基电池的运行寿命较低,制约了其在辅助调频方面的推广使用^[20]。

2.2 飞轮储能调频

飞轮储能调频是指利用电能与飞轮高速旋转的动能之间的转换达到对电能的充放效果,可通过调整飞轮的转速达到对能量转换速率的调节。其辅助火电机组调频主要是在原机组上直接增加相应的飞轮储能设备,并通过厂用变压器间接与电网并网,利用二者协调动作,达到提高系统的调频性能^[21]。飞轮储能的优势在于可以在短时间内输出很大的能量,且使用寿命较长,可达25年以上,由纯机械结构构成,不会造成污染。需要指出的是,飞轮储能的能量密度相对较低,同时维护其安全运行的成本较高,这也是限制其工业化推广的主要因素。综合而言,飞轮储能系统瞬时功率大、没有环境污染的特点,也将是代替传统不间断电源(例如蓄电池)的一种潜在推广应用的储能技术。

2.3 超级电容器储能调频

超级电容器是一种新型储能装置。相较于常规电容器,超级电容器的电极和电解质由特殊材料制成,它的介电常数、存储容量和耐压能力均有提高。

由于超级电容器内部不需要通过化学转化储能,避免了其充放过程的能量损失和过程的不可逆性,因此可达到数十万次的充放电过程。超级电容器储能调频的最大特点是能够利用其超高的功率密度实现短时间高功率的负荷输出与储存。因此十分适合作为辅助设备来配合火电机组进行一次调频工作^[22],而对于超级电容器是最大的受限因素是其投资成本较高以及储能密度较低。

2.4 耦合辅助调频技术的焦点与难点

火电机组频繁调频会引发一系列参数波动,进而使运行参数偏离设计工况运行,进而增加了系统的煤耗和偏离了经济性参数适应范围^[23]。在实际应用中,凝结水辅助调频控制技术并不能通过全关除氧器水位调节阀,最大限度地利用凝结水辅助调频^[24];蓄电池储能调频虽表现出了良好的经济效益,但也出现了多起安全事故,尤其是锂电池的使用寿命还不能满足频繁的调频需求^[25];飞轮储能调频不仅能够明显地提高整个系统的响应速度和其调节精度,而且能够通过平抑机组短时间输出功率的波动而降低煤耗,达到延长机组使用寿命的作用^[23]。但目前

国内飞轮储能市场开始发力也只有3~4年时间,还有许多技术以及安全上的问题亟待解决。如何在保证安全性的前提下提高机组运行的经济性是耦合辅助调频技术的焦点与难点所在。

3 一次调频系统建模与耦合控制策略

3.1 系统建模研究

实际机组工况测试是探索火电机组一次调频技术可行性的重要方式,然而频繁的频率变动和启停机也会带来较大的安全隐患和经济损失。为此,通过计算机计算所构建的系统模型能够对实际工况进行低成本的预判。这种研究方式可以克服试验方式存在的弊端。但是,如何科学准确地利用仿真模型反映实际系统是计算机仿真方法需要解决的重点问题^[26]。目前,对火电机组系统建模的研究主要包括对数字电液控制(Digital Electric Hydraulic Control, DEH)和协调控制系统(Coordination Control System, CCS)系统的建模。

DEH是汽轮机的主要控制系统,汽轮机组一次调频特性主要体现在DEH的动态特性上^[27],如图2所示。对于DEH建模工作,主要的难点在于DEH的执行机构—伺服系统的建模和参数辨识,电液转换器和油动机是伺服控制系统的两个重要部分,其中对阀门开度信号的建模精度直接影响着DEH模

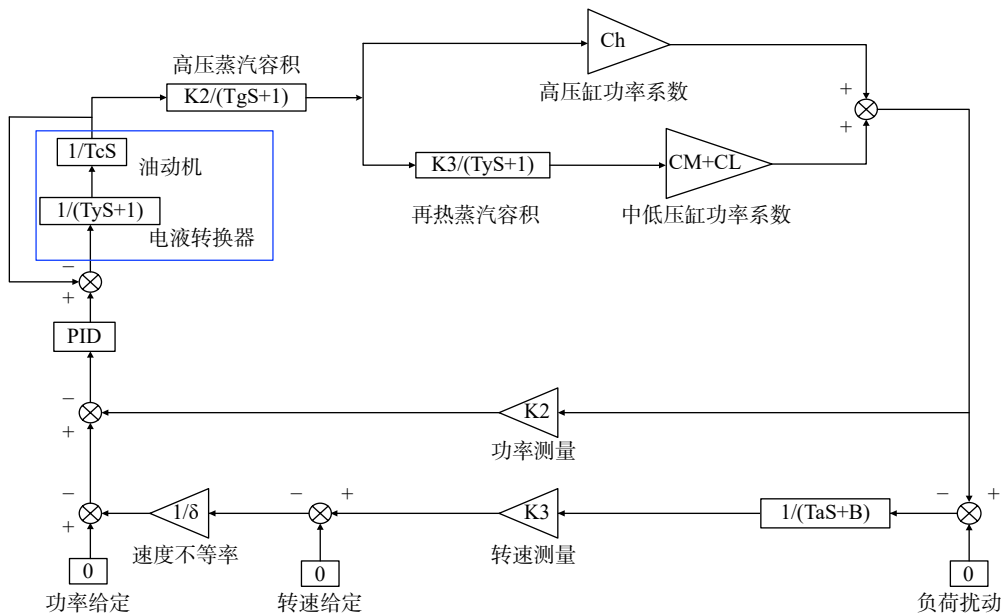


图2 典型机组 DEH 调节系统传递函数模型

Fig. 2 Transfer function model of DEH regulation system of a typical unit

型的准确性。同时, DEH 的伺服系统存在一些非线性因素, 这与其机械运动组件的行程限幅和死区有关^[28]。因此, 对于 DEH 系统建模的优化工作, 充分考虑非线性因素带来的影响, 能够进一步提高模型的精确度。

当前对一次调频的研究较多都是通过 DEH 的建模和仿真来进行的, 但机组的一次调频动态特性不仅受 DEH 影响, 也受 CCS 影响^[28]。然而, 主蒸汽压力对控制功率的影响在多数 DEH 模型里并未被考虑。但在实际运行中, 主蒸汽压力会随着阀门开度的变化而变化, 若在所建模型中忽略主蒸汽压力的影响, 则必须要求锅炉侧能完全灵活地跟随汽机侧, 实际上这是很难达到的。锅炉燃烧受传热传质速率的限制, 具有很大的惯性, 为此, 考虑 CCS 系统建模的动态特性和机组控制系统优化具有重要的意义^[27]。

3.2 控制策略研究

耦合控制策略主要指系统自身的调频与辅助调频设备间的耦合情况衔接时采用的策略。其主要方式有串联运行控制方式调频、并联运行控制方式调频以及储能参与一次调频的综合控制策略。三种方

式中, 串联运行方式反应最迅速, 且调频功率可分配给储能设备及可控负荷; 并联运行方式下, 风电等新能源发电机组, 储能设备和可控负荷可根据功率分配系数协同发出有功功率进行调节, 但其经济性不高^[29]; 储能参与的调节方式中, 具有快速响应, 灵活调节, 双向调节, 容量消耗慢等显著优点, 可以有效减小系统最大频率偏差, 改善高风电等新能源电力渗透率下的频率响应特性^[30]。

4 火电机组一次调频技术的研究展望

随着电网峰谷差的加大以及对电能质量要求的严格, 消除电网负荷波动引起的频率变化尤为重要, 为此增加了电网对机组侧的调频要求^[31]。其中, 储能火电联合调频技术在容量优化配置方面已被认定为是一种可行的方案^[32]。图 3 为近五年来对一次调频研究的关注点, 可以发现, 学者对一次调频的研究逐渐由自身调节向辅助调节转变, 甚至进一步向耦合新型储能技术等方式进一步探索。下面简单评述未来三种潜在的一次调频发展方向, 具体如下:

1) 基于区域控制偏差 (ACE) 模式协调优化

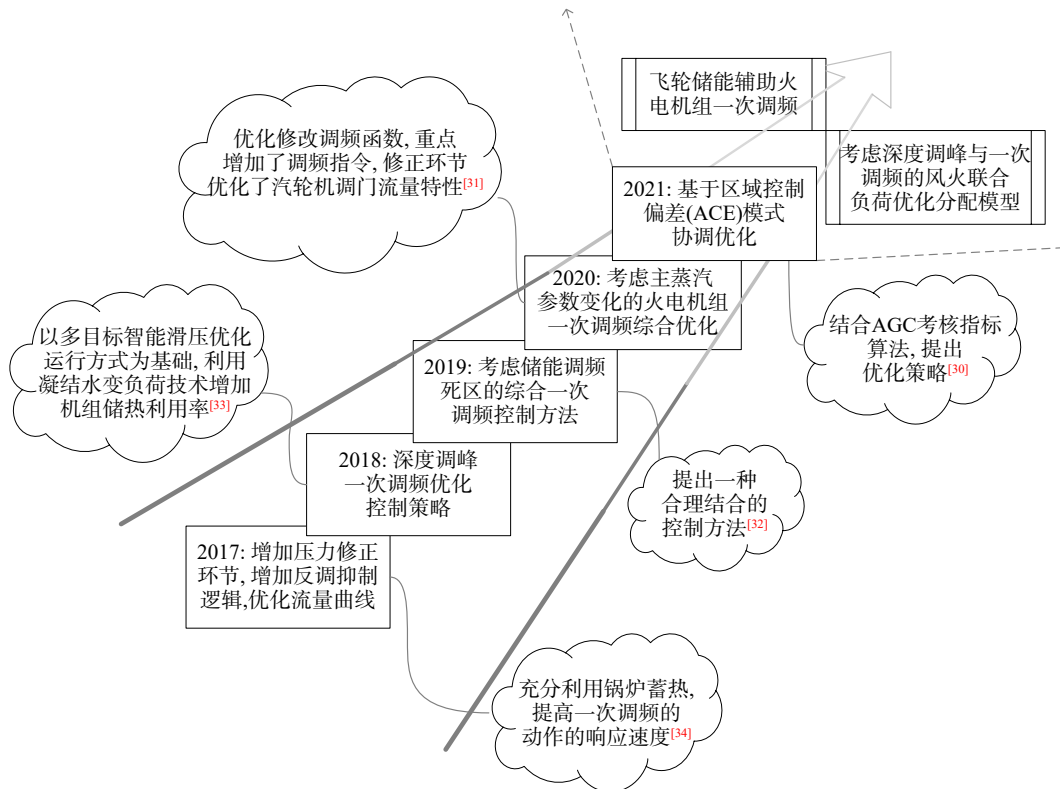


图3 近五年来一次调频研究关注点

Fig. 3 An FM research focus in the last five years

区域控制偏差 (Area Control Error, ACE) 模式协调优化是指机组 ACE 模式下, 通过策略对协调控制系统进行优化, 其优化在于结合 AGC 考核指标算法, 提出了机组负荷指令超前控制、变负荷速率校正回路、锅炉滑压设定预测控制、锅炉主控前馈自适应控制、一次调频优先控制、汽轮机调阀流量优化等策略, 主要是适应于未来能够大幅提升 AGC 综合指标。例如, 邹包产等^[31] 对某火电机组在 ACE 模式下负荷频繁变动造成的 AGC 考核指标差、主蒸汽压力偏差大等实际问题进行了理论研究, 结果表明优化策略后大幅度提升了机组 AGC 考核指标。为此, 区域控制偏差模式协调优化是未来的一个重要发展方向。

2) 飞轮储能辅助火电机组一次调频

飞轮储能辅助火电机组一次调频是指由飞轮储能承担一部分调频任务, 其优化在于调频过程中系统频率的最大暂态偏差得以减少。主要是适应于未来减少火电机组输出功率的变化范围, 延长机组寿命。例如, 何林轩等^[33] 建立两区域电网模型, 利用软件分析在阶跃扰动和连续扰动情况下有无飞轮储能参与时系统的调频效果及调频资源的出力情况。结果表明采用飞轮储能辅助一次调频可以减少电力系统频率偏差变化量和联络线上交换功率的变化范围并且减轻火电机组调频负担。为此, 飞轮储能辅助火电机组一次调频是未来的一个重要发展方向。

3) 深度调峰与一次调频的风火联合负荷优化分配

深度调峰与一次调频的风火联合负荷优化分配是指火电机组经深度改造后与风电机组一起参与一次调频, 其优化在于在保证系统调频裕度的前提下, 结合发电源的特点尽可能降低弃风量, 主要是适应于未来缓解电力系统的调峰压力。例如, 刘鑫等^[34] 提出了一种负荷优化分配模型, 该模型以风火联合系统为研究对象同时评估了机组深度调峰和一次调频的性能, 结果表明, 该模型在一次调频备用量不变的情况下, 能够缓解系统的调峰压力。为此, 深度调峰与一次调频的风火联合负荷优化分配也是未来的一个重要发展方向。

5 结论

一次调频是指通过快速调整电网机组的负荷, 以此确保电网频率稳定。本文首先对调节阀预节流、

可调整回热抽汽调频、凝结水节流调频三种调频方法进行对比分析, 认为凝结水节流是目前经济性安全性最高的方法。其次对于辅助一次调频技术, 本文主要基于蓄电池、飞轮、超级电容器三种储能方式展开讨论, 得出飞轮储能系统代替传统不间断电源(例如蓄电池)将成为未来的一种趋势, 并对目前耦合调频技术现状进行评论, 得出在保证安全性的前提下提高机组运行的经济性是焦点和重点。通过对一次调频系统建模与耦合控制策略进行评论, 可以发现 CCS 系统的建模对动态模型研究以及机组控制优化具有一定的探究价值, 并且储能参与的耦合控制策略具有显著的优点。最后结合三种优化方法对一次调频技术进行完善与展望, 其中, 滑压运行下的调频优化是重点发展方向, 尤其对供热机组具有特殊战略意义。

参考文献:

- [1] 白暴力, 程艳敏, 白瑞雪. 新时代中国特色社会主义生态经济理论及其实践指引——绿色低碳发展助力我国“碳达峰、碳中和”战略实施 [J]. 河北经贸大学学报, 2021, 42(4): 26-36. DOI: 10.14178/j.cnki.issn1007-2101.20210701.002.
BAI B L, CHENG Y M, BAI R X. The ecological economic theory on socialism with Chinese characteristics for a new era and its practical guidelines: Green and low-carbon development helps the implementation of China's strategy of "Peak Carbon Dioxide Emissions, Carbon Neutrality" [J]. Journal of Hebei University of Economics and Business, 2021, 42(4): 26-36. DOI: 10.14178/j.cnki.issn1007-2101.20210701.002.
- [2] 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. DOI: 10.13625/j.cnki.hljep.2015.01.010.
TIAN R B, YANG Y P, LIU Z W, et al. Research on primary frequency control for power system with participation of wind turbines [J]. Heilongjiang Electric Power, 2015, 37(1): 42-48. DOI: 10.13625/j.cnki.hljep.2015.01.010.
- [3] 王建君. AGC方式下火电机组间负荷优化分配方法研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2011.
WANG J J. Study on the method for optimal load dispatch of thermal power units under the AGC mode [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2011.
- [4] 盛锴, 邹鑫, 邱靖, 等. 火电机组一次调频功率响应特性精细化建模 [J]. 中国电力, 2021, 54(6): 111-118+152. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202101111.
SHENG K, ZOU X, QIU J, et al. Refined modeling for power response characteristic of thermal power unit under primary frequency control [J]. China Electric Power, 2021, 54(6): 111-118+152. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202101111.
- [5] 周艺环, 刘正, 吴子豪. 水火电力系统短期节能发电优化调度

- 的研究[J]. *电气技术*, 2017, 18(9): 66-71. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3800.2017.09.020.
- ZHOU Y H, LIU Z, WU Z H. Research on optimal dispatch of short-term energy-saving power generation in hydro thermal power system [J]. *Electrical technology*, 2017, 18(9): 66-71. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3800.2017.09.020.
- [6] 殷建华, 于海存, 霍红岩, 等. 基于电网考核细则的火电机组一次调频优化[J]. *内蒙古电力技术*, 2019, 37(3): 77-82+86. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6218.2019.03.023.
- YIN J H, YU H C, HUO H Y, et al. Optimization of primary frequency compensation for thermal units based on power grid examination rules [J]. *Inner Mongolia Electric Power*, 2019, 37(3): 77-82+86. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6218.2019.03.023.
- [7] 吴欣, 吴宁, 孙海涛等. 火电机组一次调频性能提升实践[J]. *山东电力技术*, 2018, 45(3): 65-68. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9904.2018.03.015.
- WU X, WU N, SUN H T, et al. Practice of improving the performance of primary frequency regulation of thermal power unit [J]. *Shandong Electric Power*, 2018, 45(3): 65-68. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9904.2018.03.015.
- [8] 李强. 700 MW机组调频辅助服务控制系统优化提升[J]. *南方能源建设*, 2021, 8(3): 114-121. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.017.
- LI Q. Optimization and improvement of frequency modulation auxiliary service control system for the 700 MW unit [J]. *Southern Energy construction*, 2021, 8(3): 114-121. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.017.
- [9] 庄义飞. 火电机组一次调频分析及性能优化[J]. *黑龙江电力*, 2019, 41(2): 151-157+162. DOI: 10.13625/j.cnki.hljep.2019.02.013.
- ZHUANG Y F. Primary frequency modulation analysis and performance optimization of thermal power units [J]. *Heilongjiang Electric Power*, 2019, 41(2): 151-157+162. DOI: 10.13625/j.cnki.hljep.2019.02.013.
- [10] 余海鹏, 康剑南. 660 MW等级超超临界机组的进汽调节方式分析[J]. *内蒙古科技与经济*, 2017, 21(16): 108-109.
- YU H P, KANG J N. Analysis of inlet steam regulation mode of the 660 MW ultra-supercritical unit [J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2017, 21(16): 108-109.
- [11] 杜洋洋, 冯伟忠. 基于弹性回热技术的调频性能研究[J]. *华东电力*, 2014, 42(9): 1944-1949.
- DU Y Y, FENG W Z. Research of properties of frequency regulation based on the flexible extraction technology [J]. *East China electric power*, 2014, 42(9): 1944-1949.
- [12] 刘吉臻, 王耀函, 曾德良, 等. 凝结水节流参与的超超临界机组一次调频控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(24): 7216-7222+7435. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.162405.
- LIU J Z, Wang Y H, ZENG D L, et al. A primary frequency regulation method of USC units based on condensate throttling [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(24): 7216-7222+7435. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.162405.
- [13] 包伟伟, 曹瑞峰, 段金鹏, 等. 1 000 MW超超临界机组一次调频技术经济性分析[J]. *发电设备*, 2018, 32(5): 348-352+356.
- BAO W W, CAO R F, DUAN J P, et al. Techno economic analysis on primary frequency regulation technologies of a 1 000 MW ultra-supercritical unit [J]. *Power Equipment*, 2018, 32(5): 348-352+356.
- [14] 李兴华, 段金鹏. 660 MW高效超超临界机组配汽方式研究及应用分析[J]. *汽轮机技术*, 2020, 62(3): 227-230. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2020.03.019.
- LI X H, DUAN X P. Study and application analysis on steam inlet mode of 660 MW ultra-supercritical unit [J]. *Steam Turbine Technology*, 2020, 62(3): 227-230. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2020.03.019.
- [15] 康浩强, 何青, 杜冬梅. 汽轮发电机组一次调频技术分析[J]. *电力与能源*, 2019, 40(2): 269-274.
- KANG H Q, HE Q, DU D M. Technical analysis of primary frequency modulation for turbine generator set [J]. *Power and energy*, 2019, 40(2): 269-274.
- [16] 高春雷. 储能技术在电力系统中的应用[J]. *黑龙江电力*, 2013, 35(5): 394-396+426. DOI: 10.13625/j.cnki.hljep.2013.05.010.
- GAO C L. Application of energy storage technology in electric power system [J]. *Heilongjiang Electric Power*, 2013, 35(5): 394-396+426. DOI: 10.13625/j.cnki.hljep.2013.05.010.
- [17] 井文辉. 电池储能参与电网辅助调频的控制策略及优化配置研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- JING W H. Research on control strategy and optimizing configuration of battery energy storage participating in auxiliary frequency modulation of power grid [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [18] 李庆成. 电池储能辅助火电机组调频研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- LI Q C. Research on frequency modulation of thermal power unit assisted by battery energy storage [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.
- [19] 张汝峰. 飞轮储能辅助火电机组调频技术研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
- ZHANG R F. Reserch on frequency regulation technology of flywheel energy storage aided thermal power unit [D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2021.
- [20] 李林高. 电池储能系统辅助火电机组参与电网调频的控制策略优化[D]. 太原: 山西大学, 2020.
- LI L G. Control strategy optimization of battery energy storage system to assist thermal power units to participate in grid frequency modulation [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020.
- [21] 黄登超. 300 MW供热机组飞轮储能辅助调频研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020.
- HUANG D C. Research on flywheel energy storage auxiliary frequency modulation of 300 MW heating unit [D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2020.
- [22] 苏小林, 李丹丹, 阎晓霞, 等. 储能技术在电力系统中的应用分析[J]. *电力建设*, 2016, 37(8): 24-32. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2016.08.004.
- SU X L, LI D D, YAN X X, et al. Application analysis of energy storage technology in power system [J]. *Electric Power*

- Engineering, 2016, 37(8): 24-32. DOI: [10.3969/j.issn.1000-7229.2016.08.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7229.2016.08.004).
- [23] 隋云任. 飞轮储能辅助600 MW燃煤机组调频技术研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020.
- SUI Y R. Research on frequency modulation technology of coal burning plants with auxiliary of flywheel energy storage [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2020.
- [24] 胡尊民, 于国强, 爰建军, 等. 凝结水辅助调频控制难点分析 [J]. 热能动力工程, 2020, 35(4): 293-299. DOI: [10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.04.040](https://doi.org/10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.04.040).
- HU Z M, YU G Q, SHU J Y, et al. Analysis of difficulties in controlling the auxiliary frequency-modulation by condensation water [J]. Thermal Power Engineering, 2020, 35(4): 293-299. DOI: [10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.04.040](https://doi.org/10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.04.040).
- [25] 王伟, 陈钢, 常东锋, 等. 超级电容辅助燃煤机组快速调频技术研究 [J]. 热力发电, 2020, 49(8): 111-116. DOI: [10.19666/j.rlfid.202003091](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202003091).
- WANG W, CHEN G, CHANG D F, et al. Super capacitor aided fast frequency modulation technology of coal-fired unit [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 111-116. DOI: [10.19666/j.rlfid.202003091](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202003091).
- [26] 王若宇. 基于粒子群算法辨识的火电机组一次调频系统建模及性能提升 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
- WANG R Y. Modeling and Performance Improvement of primary frequency modulation system of thermal power unit based on particle swarm optimization identification [D]. Jinan: Shang Dong University, 2020.
- [27] 廖金龙. 大功率火电机组一次调频能力建模与优化 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- LIAO J L. Primary frequency control ability modeling and optimization of large-scale thermal power units [D]. Hanzhou: Zhe Jiang University, 2020.
- [28] ZHU Y, JIANG W L, KONG X D, et al. Study on nonlinear dynamics characteristics of electrohydraulic servo system [J]. Nonlinear dynamics, 2015(80): 723-737. DOI: [10.1007/s11071-015-1901-z](https://doi.org/10.1007/s11071-015-1901-z).
- [29] 李润, 徐天奇, 李琰, 等. 不同控制策略下虚拟电厂一次调频特性研究 [J]. 现代电子技术, 2021, 44(17): 95-99. DOI: [10.16652/j.issn.1004-373x.2021.17.018](https://doi.org/10.16652/j.issn.1004-373x.2021.17.018).
- LI R, XU T Q, LI Y, et al. Study on primary frequency modulation characteristics of virtual power plant using different control strategies [J]. Modern Electronic Technology, 2021, 44(17): 95-99. DOI: [10.16652/j.issn.1004-373x.2021.17.018](https://doi.org/10.16652/j.issn.1004-373x.2021.17.018).
- [30] 李军徽, 高卓, 李翠萍, 等. 基于动态任务系数的储能辅助风电一次调频控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 52-59. DOI: [10.7500/AEPS20210112002](https://doi.org/10.7500/AEPS20210112002).
- LI J H, GAO Z, LI C P, et al. Dynamic task coefficient based primary frequency regulation of wind power assisted by energy storage [J]. Power System Automation, 2021, 45(19): 52-59. DOI: [10.7500/AEPS20210112002](https://doi.org/10.7500/AEPS20210112002).
- [31] 邹包产, 赵宇, 李云, 等. 基于BP神经网络的汽轮机调阀流量特性校正 [J]. 电力科学与工程, 2017, 33(5): 60-64. DOI: [10.3969/j.issn.1672-0792.2017.05.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-0792.2017.05.012).
- ZOU B C, ZHAO Y, LI Y, et al. Correction of Flow Characteristic of Steam Turbine Governing Valve Based on BP Neural Network [J]. Electric Power Science and Engineering, 2017, 33(5): 60-64. DOI: [10.3969/j.issn.1672-0792.2017.05.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-0792.2017.05.012).
- [32] 印佳敏, 郑赞, 杨劲. 储能火电联合调频的容量优化配置研究 [J]. 南方能源建设, 2020, 7(4): 11-17. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.002).
- YIN J M, ZHENG Y, YANG J. Research on Capacity Optimization of Generator-storage Combined Frequency Regulation System [J]. Southern Energy construction, 2020, 7(4): 11-17. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.002).
- [33] 何林轩, 李文艳. 飞轮储能辅助火电机组一次调频过程仿真分析 [J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1679-1686. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0283](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0283).
- HE L X, LI W Y. Simulation of the primary frequency modulation process of thermal power units with the auxiliary of flywheel energy storage [J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1679-1686. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0283](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0283).
- [34] 刘鑫, 王康平, 郭相阳, 等. 计及深度调峰与一次调频的风火负荷优化分配 [J/OL]. 电测与仪表: 1-9. (2021-05-18) [2021-11-19]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210518.1121.002.html>.
- LIU X, WANG K P, GUO X Y, et al. Load optimal distribution of wind power and thermal power with the coordination of deep peak regulation and primary frequency modulation [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-9. (2021-05-18) [2021-11-19]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210518.1121.002.html>.

作者简介:



袁春峰

袁春峰 (第一作者)

1988-, 男, 辽宁锦州人, 硕士, 工程师, 主要从事电厂集控运行、火电机组灵活性改造研究等(e-mail)1355211110@qq.com。



王金星

王金星 (通信作者)

1985-, 男, 河北唐山人, 博士, 博士后, 讲师, 主要从事燃煤热电联产系统灵活运行及储能参数优化设计研究(e-mail)wangruoquang860928@126.com。

(编辑 叶筠英)