

飞轮储能技术及其耦合发电机组研究进展

徐宪龙^{1,2}, 张艺凡³, 孙浩程³, 赵浩腾³, 赵国睿³, 杨浩³, 魏书洲^{1,2,✉}

(1. 三河发电有限责任公司, 河北 廊坊 065201; 2. 河北省燃煤电站污染防治技术创新中心, 河北 廊坊 065201;
3. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: [目的] 双碳目标的提出增加了新能源电力嵌入的必要性, 为了研究提高机组灵活性的方法, 文章对飞轮储能技术及其耦合发电机组的相关研究进行了详细介绍。[方法] 文章概括总结了飞轮储能的工作原理、研究现状与成果以及应用难点与措施, 分析了研究飞轮储能的系统建模与运行策略的具体方法, 并对飞轮储能分别耦合火力发电、风力发电以及太阳能发电的原理与应用特点进行了重点分析。[结果] 我国的飞轮储能系统研究已经取得较为先进的成果, 并且形成了一套有效的研究方法, 在飞轮储能技术耦合多能源发电机组方面也进行了一定的研究。[结论] 在当今环境下, 飞轮储能技术耦合多能源发电机组已经成为研究趋势与重点, 本文所总结内容为后续飞轮储能技术的应用提供了参考。

关键词: 飞轮储能; 工作原理; 系统建模; 运行策略; 多能源发电机组

中图分类号: TK01; TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)03-0119-08

开放科学(资源服务)二维码:



Research Progress of Flywheel Energy Storage Technology and Its Coupling Power Generation

XU Xianlong^{1,2}, ZHANG Yifan³, SUN Haocheng³, ZHAO Haoteng³, ZHAO Guorui³, YANG Hao³, WEI Shuzhou^{1,2,✉}

(1. SanHe Power Plant Ltd., CHN Energy, Langfang 065201, Hebei, China; 2. Hebei Innovation Center for Coal-fired power station Pollution Control, Langfang 065201, Hebei, China; 3. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China)

Abstract: [Introduction] The proposal of the "carbon peak and neutrality" goal increases the necessity of new energy power embedding. To study the method to improve the flexibility of the unit, this paper introduces the flywheel energy storage technology and the related research of the coupled generator set in detail. [Method] The working principle, research status, and achievements of flywheel energy storage as well as application difficulties and measures were summarized, and the specific methods of studying the system modeling and operation strategy of flywheel energy storage were analyzed, and the principle and application characteristics of flywheel energy storage coupled with thermal power generation, wind power generation and solar power generation were analyzed emphatically. [Result] This paper shows that the research on flywheel energy storage systems in China has achieved relatively advanced results and formed a set of effective research methods, and some research has been done on the coupling of flywheel energy storage technology with multi-energy generator set. [Conclusion] In today's environment, flywheel energy storage technology coupled with multi-energy generators has become a research trend and focus, the summary of this paper provides a reference for the subsequent application of flywheel energy storage technology.

Key words: flywheel energy storage; working principle; system modeling; running strategy; multi-energy generator set

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/>).

收稿日期: 2022-05-25 修回日期: 2022-06-21

基金项目: 河北省自然科学基金绿色通道项目“生活垃圾成分多变性对污染物生成与燃烧过程影响机制研究”(E2021203041)

0 引言

“碳达峰、碳中和”政策的提出,为我们能源结构转型统筹碳减排任务指明了方向^[1]。对我国来说,超前的绿色能源布局和发掘新能源的潜能是实现低碳目标的重要基础。因此,新能源电力的大量并网已是大势所趋。然而,新能源电力的波动性和不确定性对原有火电机组的冲击是实现目标过程中面对的一大难题^[2]。提高发电机组一次调频能力是解决这一难题的重要途径之一。我国已经有多位学者采用各种方法进行研究。例如,任晓辰通过削弱主蒸汽压力拉回路影响、取消一次调频指令滤波环节、增加一次调频指令缓回功能和提升主蒸汽工作压力对一次调频的修正功能来进行一次调频的优化,结果是机组各主要参数可以保持稳定,最终可以保证负荷的响应速度和精度都可以符合标准要求,主蒸汽压力的动态偏差和静态偏差都会比原来更小^[3]。王宪^[4]将电网负荷划分为不同周期分配给飞轮储能与火电机组,结果发现整体的调频效果明显改善。蒋华婷^[5]对飞轮储能与锂离子电池联合参与二次调频进行研究,结果是设计出以经济性最优为目标的储能容量配置方案。隋云任等^[6]对二次调频的研究主要是通过飞轮储能辅助燃煤机组进行的,结果证实该方案可以减小主蒸汽压力波动范围,同时显著提高调频性能。

飞轮储能不仅在工业中有自己的应用,在生活中用处也十分广泛。例如,分布式飞轮储能式电动汽车快速充电站,解决了电动汽车在瞬时接入充电站造成的电力电子设备受损和电网电压突变等问题。该调控策略能够平衡分布飞轮储能快速充电站的直流母线电压和各个装置的功率。该控制策略为两级式控制策略:一级控制器主要用来平衡电动汽车充电器在瞬时接入电网时造成的功率波动;二级控制器主要用于解决 FESS 响应时间长、FESS 分布放置造成的各直流母线连接处电压差异较大等问题。通过实时仿真系统证实,采用该方法后,电动汽车在瞬时接入时变换器输出电流上升平稳、电压波动较小。同时,实验结果表明,该方法可以平衡各 FESS 的充放电功率,使 FESS 能够快速响应脉冲式大功率负载^[7]。

然而现有的飞轮储能技术仍然没有统一的耦合

应用指标。为此,本文将系统评述飞轮储能技术的工作原理及其研究现状,最后对风电、火电、太阳能等多能源与飞轮储能的耦合发电机组进行研究和讨论。

1 飞轮储能系统应用特点

1.1 工作原理

飞轮储能系统,又可以称为电动机械电池或飞轮电池,是一种能实现电能与机械能相互转换,同时可以储存机械能和输出电能的设备^[8]。飞轮储能系统的主要构成元件包括高速飞轮、电力电子设备、永磁电动/发电机、真空室、磁轴承系统及其他附加设备等,飞轮储能系统的具体工作原理为:在用电低谷期,飞轮储能系统的电力电子设备将电网提供的电能用于驱动电动机工作,同时使其带动飞轮高速旋转,来实现电能转化为机械能的储能过程;而在用电高峰期,高速旋转的飞轮能够带动发电机旋转,通过电力电子设备将电能进行整流和调频等变化后再稳定地向外输出,从而实现机械能转化为电能的输出能量过程^[9],飞轮储能装置的工作原理如图1所示。

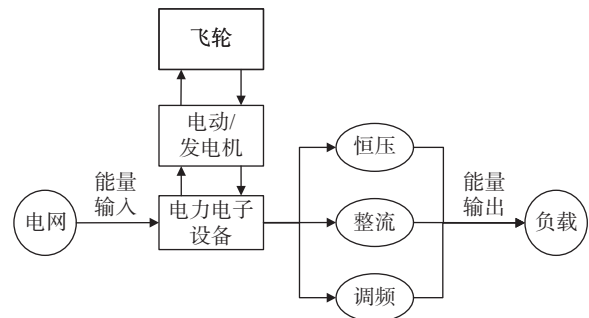


图1 飞轮储能系统的工作原理

Fig. 1 The working principle of flywheel energy storage system

1.2 研究过程与现状

从1990年至今,美国、欧洲和日本是全世界飞轮储能技术开发和研究的三大主要集中地。与发达国家相比,我国的飞轮储能技术发展较晚,同时一些硬件设施,如技术水平和投资规模等都相对较低。在我国,目前就飞轮储能技术展开相关研究的单位数量有十余家,同时,其研究关于飞轮储能设备的范围较广,其中包括就飞轮储能自身性能的研究包括复合材料飞轮、高速电机分析和设计、多型电机的选用、轴系动力学、充放电测试、飞轮储能系统充放

电控制方法与策略等;飞轮储能技术在实际工程中的应用主要包括风力发电动态电压补偿、动力调峰、电网调频等电力行业应用等^[10]。此外,随着相关环

保政策的推行与实际工程的需要,相关科研单位与学者加大了对其的研究与开发,并取得了一些较为先进的科研成果,研究进程与现状如图2所示。

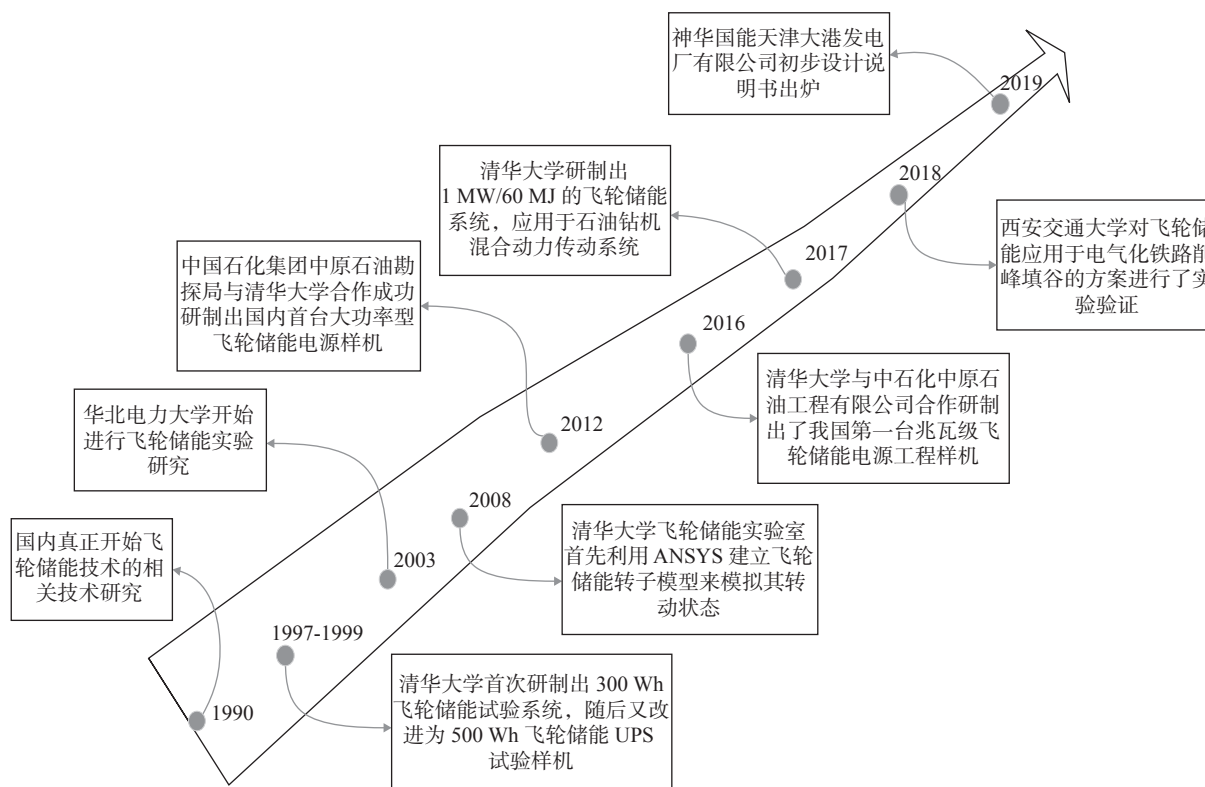


图2 国内飞轮储能研究现状

Fig. 2 Research status of flywheel energy storage in China

现有飞轮储能与发电机组耦合的研究主要关注点包括如何维持飞轮储能的正常工作状态以及维持锅炉压力稳定、节省煤耗,使飞轮储能快速响应外界负荷变化。目前飞轮储能技术应用情况如表1所示。

隋云任等^[11]在飞轮储能辅助的600 MW燃煤机组调频中进行研究发现,当燃煤机组耦合了12 MW的飞轮储能系统之后,燃煤机组运行的稳定性与调峰调频能力得到了显著提高。主蒸汽压力波动趋于平稳,其压力变化量峰值减少到了未改造机组蒸汽压力变化幅度的1/9。此外,其波动恢复稳定所需要的时间缩短了175 s。因此,当机侧的变流器控制输出功率时,用网侧变流器来控制的与直流母线相连接的飞轮储能系统控制策略是具有工程意义的,可以维持系统稳定运行并且提高飞轮储能系统的辅助调频能力。在参与功率调节时,耦合飞轮储能装置

辅助调频的燃煤机组,火电机组的汽轮机输出功率所受到的外界的负荷扰动也随之减少,同时也可以保护到热力发电设备。目前,飞轮储能的应用方法灵活、应用场景广泛,可单台应用也可多台并联共同调节来提供更大的储能容量,来辅助电网中的调峰工作;还可作为调频电厂,来起到稳定电网频率、平衡负荷的作用^[14]。

总的来说,在陆用电网电站,飞轮储能的应用更加成熟,而在独立电站上的应用,如舰船等仍然还处于起步阶段中,工程化的应用还较少,但已经引起了许多研究学者的高度重视。随着电力系统的综合发展、电力推进的普及、大功率负载的增加、高能武器的装备、电磁弹射的使用以及电力系统供电稳定性与供电品质问题等逐步显现,飞轮储能的作用也将日渐突出^[15]。

表1 飞轮储能技术应用

Tab. 1 Application of flywheel energy storage technology

年份	发电机组形式	功率	关注参数	耦合飞轮储能后的效果	参考文献
2020	600 MW 燃煤机组	12 MW 飞轮辅助	主蒸汽压力变化量峰值	主蒸汽压力变化量峰值由原来的 8.4×10^{-4} p.u.MPa减少至 3.8×10^{-4} p.u.MPa。	[11]
2020	600 MW 燃煤机组	6 MW 飞轮辅助	电力系统的频率变化量峰值	电力系统的频率变化量峰值由 6.48×10^{-4} p.u.Hz降低到 3.92×10^{-4} p.u.Hz, 频率变化量标准差由 1.88×10^{-4} p.u.Hz降低到 1.01×10^{-4} p.u.Hz。	[11]
2020	300 MW 燃煤机组	6 MW 飞轮辅助	汽轮机输出功率变化量峰值	汽轮机输出功率变化量峰值由原来的10.17 MW减少至6.42 MW, 输出功率变化量标准差由原来的3.78 MW减少了1.41 MW。	[11]
2021	1.5 MW双馈 风电机组	0.3 MW 飞轮储能系统	PCC电压	PCC处电压波动相对变小, 从而一定程度上稳定了风电系统的电压波动性。	[12]
2020	300 MW 供热机组	3 MW 飞轮辅助	系统响应时间	系统的响应时间由2 s缩短到0.01 s以内, 完成调频目标负荷的时间也由15 s降低到5 s左右。	[13]

1.3 应用难点与对策

在真空环境下, 电机及电磁轴承的散热性能的优劣直接关系到飞轮储能系统是否能够安全运行, 是目前飞轮储能技术亟待解决的关键科学技术问题, 因此, 针对飞轮储能系统热管理的研究具有工程价值。其冷却技术根据其结构不同有不同的方式, 电机定子的冷却手段主要包括水冷、风冷、油冷、相变冷却以及热管冷却等, 而电机转子的冷却手段则主要是填充惰性气体来增强对流换热、轴孔内使用油冷、为强化辐射换热使用扩展表面等。目前, 高速飞轮储能系统采用的轴承主要有高温超导磁悬浮轴承和电磁轴承, 传统的电磁轴承, 主要冷却方式为水冷; 而高温超导磁悬浮轴承主要通过填充低压氦气的方式来进行冷却。对于飞轮储能系统而言, 如何更好地对系统转子散热才是热管理的重点和难点。转子散热可行的解决方案主要有填充低温惰性气体以强化转子对流换热、电机低损耗设计以消除高频激波以及真空油冷等。

2 飞轮储能系统建模与控制

2.1 系统建模研究

结合国内飞轮储能技术建模研究工作可以发现: 飞轮储能系统的建模研究工作绝大多数都是在 MATLAB/Simulink 环境下开展进行的。例如, 杨忠生^[16]在 MATLAB/Simulink 环境下, 建立了分布式飞轮储能充放电系统的仿真模型, 分别对系统的充电和放电过程进行了建模与仿真研究, 得到了适合于分布式飞轮储能充放电系统的 PI 参数, 并分析了各

参数对系统运行的影响。夏青^[17]利用 MATLAB/Simulink 仿真工具, 对 MPPT 控制系统进行了仿真, 得到光伏发电机组的最大功率; 同时对 SPWM 控制系统进行了仿真, 得到了控制波和载波的幅值与频率的相关数据, 并据此得到了与电机相匹配的三相交流电压。毕文骏^[18]运用 MATLAB/Simulink 仿真工具建立了整流机组模型以及机车动态模型, 并对地铁列车的牵引传动系统进行了建模模拟, 确定了系统的主要电气参数; 同时分析了不同运行工况下牵引电网的电压及电流波形, 并据此设计了后续的再生制动能量回收利用方案。姚远^[19]利用 MATLAB/Simulink 仿真工具搭建了风力发电系统与飞轮储能系统的联合仿真模型, 同时采用不同的运行策略分别控制飞轮的充电和放电过程, 进一步通过仿真模拟分析了风速突变对风力发电系统的各部分电气参数的影响, 验证了飞轮储能系统对独立型风力发电机组系统供给负载能量时的稳定性作用。综上所述, 飞轮储能系统的建模工作所采用的研究方法较为单一, 多数利用 MATLAB/Simulink 进行建模仿真与分析, 且研究主要集中在寻找最优电气参数方面。

2.2 控制策略研究

飞轮储能系统的控制策略的选择主要依据其所使用的轴承的类型: 机械轴承的结构和工作原理简单, 因此其控制系统也相应地简单; 超导磁悬浮轴承可自行调节并稳定悬浮, 因此不需要外界进行控制; 电磁轴承为多变量变耦合非线性系统, 因此其工作原理与控制策略等都相对复杂: 控制系统主要由位移传感器、控制系统和功率放大器元件组成^[20-21]。

同时,飞轮储能系统的控制系统也与飞轮的运转工况有关:当飞轮转子运行转速低且对轴的压力较小的情况下,系统各部分耦合不明显,因而可将其忽略,并针对转子进行全工作范围内的非线性特征设计。在此基础下的控制方法主要有:PID控制方法^[22]、滑模控制方法^[23]、神经网络控制方法。而在系统各部分耦合明显的运行工况下,则选择使用解耦控制,使得各个控制系统之间的耦合接触,一个控制只能作用在一个输出上^[24]。其主要包括前馈解耦控制方法^[25]、主动干扰抑制解耦控制等。各控制方法的特点如表2所示。

目前,飞轮储能系统的控制方法以非解耦控制为主,但随着飞轮技术的发展,飞轮的转速越来越快、重量越来越大,系统各个部分的耦合现象越来越明显,非解耦控制的局限性逐渐体现出来,因此,解耦控制方法成为当今的主要研究方向,有较大的需求与广泛的应用前景。

表2 不同控制策略的特点

Tab. 2 Characteristics of different control strategies

方法类型	运行特点	应用限制
PID控制方法	技术最成熟、应用最广泛。	转子脱离线性工作范围,其控制相应会变慢甚至使得转子失稳 ^[26] 。
滑模控制方法	能够克服系统不确定性。	在切换超平面时容易引起系统震颤,使其工作不稳定,同时也使得系统更复杂。
神经网络控制方法	可改善非线性时变特征。	在实际应用中系统比较复杂 ^[27] 。
前馈解耦控制方法	可有效实现解耦效果,并且有较好的抗干扰能力。	难获得完全准确的转子系统参数 ^[25] 。
主动干扰抑制解耦控制	对外部干扰的变化具有较强的鲁棒性和适应性。	系统微小振动难以消除。

3 与多能源的耦合应用与展望

飞轮储能在发展的过程中势必会与其他多种能源相互耦合,这对提高系统效率和消纳新能源有着重要的意义。图3所示流程图为飞轮储能系统分别在火力发电、风力发电以及太阳能发电中的实际应用流程与原理。其中图3(a)为与火力发电相耦合的工作流程:当电网频率小于允许值时,飞轮储能系统

接收指令,飞轮储能系统以发电状态被调用并快速响应,降低自身转速,将机械能转化为电能释放到电网,快速弥补电网功率的不足并对其进行调频;当电网频率大于最大允许值时,飞轮储能系统接收指令,飞轮储能快速响应并以充电状态被调用,提高自身转速,吸收电网中的电能转化为自身的机械能储存起来,快速消耗电网的多余功率使其转化为自身的机械能,有效维持了电网功率的稳定。图3(b)为与风力发电相耦合的工作流程;飞轮储能与风力发电相配合发电,可以有效克服风力发电在时空方面上的不均匀性,有效提高对于风能的利用效率,使电力生产环节更加稳定:当风力发电输出电流小于电网所要求的输出电流时,则飞轮储能系统接收指令,以放电状态被调用,自身开始减速将机械能转化为电能来供给电流;反之,当风力发电输出电流大于电网所要求的输出时,则飞轮储能系统接收指令,以充电状态被调用,自身飞轮加速旋转将多余电能转化为机械能储存起来,以此来维持电网电流的稳定。图3(c)为与光伏发电相耦合的工作流程:光伏发电的输出功率会随着光照强度的变化而变化,由于太阳光照在时间上的不稳定性使其难以准确地预测,这些因素都会影响发电设备的电压或者频率的稳定。为保证光伏发电的产能与发电质量,合理应用储能系统就显得尤为重要。因此在太阳能发电系统中使用飞轮储能装置来保证系统的稳定运行,同时还有利于解决电压跌落以及瞬间供电中断等由于供电不稳定性所引起的问题^[28]。

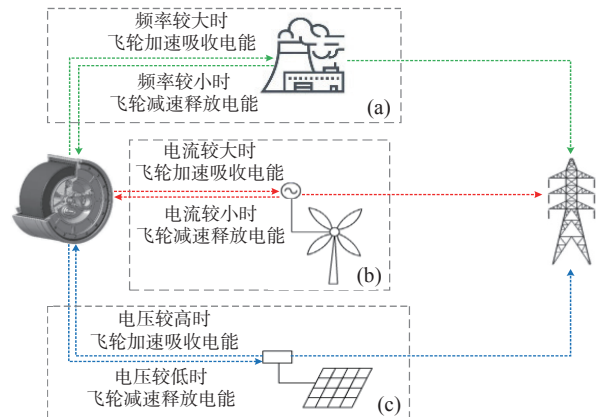


图3 系统工作流程图

Fig. 3 System work flow chart

3.1 火力发电与飞轮储能技术的耦合

电力系统需要保持供电与发电之间的平衡,为了维持电网系统的稳定,两者的频率应保持一致。现如今,国内大多数的调频工作有火力发电厂提供,而由于火力发电厂对指令的响应速度较慢,无法精准调频,因而不适合高频次调频工作。此外,如果经常调用火力发电厂参与电厂调频工作,则会加快电厂设备的老化,降低燃料的利用率,增加维护成本,减少整个发电机组的使用寿命。因而利用飞轮储能设备分担一部分调频工作可以一定程度上提高电厂的生产效率^[29]。

当电网频率出现波动时,火电机组承担主要调频工作,飞轮储能系统则同时做出反应并分担部分工作,通过自身的充放电来调剂输出功率以达到减少机械功率与电磁功率的差值从而减小电力系统频率的偏差的目的,所以该耦合系统的优点为提高了电力系统的稳定性以及生产效率^[1]。

3.2 风力发电与飞轮储能技术的耦合

风能属于清洁能源,存在空间上的不均匀性,在部分地区风力资源较为发达,例如中国的云贵蒙等地布局风能较为集中。然而风力发电的缺点为风能具有周期性和不稳定性,其导致产能以及发电质量的不稳定性。以上缺点大大阻碍了风力发电的应用推广与效益提升,并降低了电力系统的稳定性。因而选择使用飞轮储能对其进行耦合的优点同样是提高了电力系统的稳定性^[30]。

3.3 太阳能发电与飞轮储能技术的耦合

随着能源危机与环境污染的日渐严重,太阳能作为一种取之不尽用之不竭且可用量巨大的清洁能源,具有较强的发展潜力。但是太阳能具有典型分布式能源的特点,电能生产在时空上不稳定且不易收集和储存,当前主要为使用光伏发电并将电能储存在储能设备中实现对太阳能的储备。然而,分布式能源由于其在时空上分布不均匀且具有周期性,导致发电质量具有差异性,贸然并网可能会对电网造成冲击,因此多采用独立光伏发电系统生产并储存电能。飞轮储能系统具有使用寿命长,不会造成污染,充电速度快等优点,将二者结合将实现电能的更有效利用。在基于飞轮储能系统的独立光伏直流发电系统中,直流母线将直流负载、交流负载、逆变

器等设备与飞轮储能系统直接连接。飞轮储能系统则利用自身的充放电调节,使得直流母线上的电压保持稳定,所以该耦合系统的优点为显著地提高了供电质量以及太阳能的利用率^[31]。

4 结论

发展飞轮储能及其耦合发电机组技术是应对新能源电力的波动性和不确定性的的重要方式之一。本文首先详细介绍了飞轮储能技术的工作原理、研究现状与成果以及应用难点与对策;然后通过介绍飞轮储能系统的建模研究以及控制策略研究具体地说明了当前研究飞轮储能系统的主要手段与具体方法,最后着重就飞轮储能技术与火力发电、风力发电以及太阳能发电相耦合的技术原理与特点进行了讨论,为飞轮储能耦合多能系统提供了借鉴思路。

参考文献:

- [1] 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.
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.
- [2] 张翼,魏书洲,任学武,等. 风电-抽凝机组耦合系统供暖方案研究 [J]. *热力发电*, 2021, 50(11): 54-60, 67. DOI: 10.19666/j.rfd.202106111.
ZHANG Y, WEI S Z, REN X W, et al. Heat supply schemes for a coupling system of condensing unit and wind power [J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(11): 54-60, 67. DOI: 10.19666/j.rfd.202106111.
- [3] 任晓辰. 火电机组一次调频和AGC原因与优化分析 [J]. *集成电路应用*, 2021, 38(3): 116-117. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2021.03.052.
REN X C. Analysis of primary frequency regulation optimization and AGC cause for thermal power units [J]. *Applications of IC*, 2021, 38(3): 116-117. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2021.03.052.
- [4] 王宪. 飞轮储能技术在电网频率控制中的应用研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2018.
WANG X. Research on application of flywheel energy storage technology in power grid frequency control [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2018.
- [5] 蒋华婷. 储能系统参与自动发电控制的控制策略和容量配置 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019. DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2019.001046.

- JIANG H T. The control strategy and capacity configuration of energy storage system participating in automatic generation control [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2019. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2019.001046](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2019.001046).
- [6] 隋云任, 梁双印, 黄登超, 等. 飞轮储能辅助燃煤机组调频动态过程仿真研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(8): 2597-2605. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.190921](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.190921).
- SUI Y R, LIANG S Y, HUANG D C, et al. Simulation study on frequency modulation process of coal burning plants with auxiliary of flywheel energy storage [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(8): 2597-2605. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.190921](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.190921).
- [7] 叶刚进, 孙可, 杨翮, 等. 飞轮储能式电动汽车充电站的分布式协同控制策略 [J]. *现代电力*, 2020, 37(5): 526-531. DOI: [10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0120](https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0120).
- YE G J, SUN K, YANG X, et al. Research of distributed cooperative control strategy for fast charging stations with flywheel energy storage system [J]. *Modern Electric Power*, 2020, 37(5): 526-531. DOI: [10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0120](https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0120).
- [8] 赵韩, 杨志轶, 王忠臣. 新型高效飞轮储能技术及其研究现状 [J]. *中国机械工程*, 2002, 13(17): 1521-1524. DOI: [10.3321/j.issn:1004-132X.2002.17.025](https://doi.org/10.3321/j.issn:1004-132X.2002.17.025).
- ZHAO H, YANG Z Y, WANG Z C. A novel and high efficiency flywheel energy storage technology and its research situation [J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(17): 1521-1524. DOI: [10.3321/j.issn:1004-132X.2002.17.025](https://doi.org/10.3321/j.issn:1004-132X.2002.17.025).
- [9] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用 [J]. *电网技术*, 2008, 32(7): 1-9.
- ZHANG W L, QIU M, LAI X K. Application of energy storage technologies in power grids [J]. *Power System Technology*, 2008, 32(7): 1-9.
- [10] 戴兴建, 魏鲲鹏, 张小章, 等. 飞轮储能技术研究五十年评述 [J]. *储能科学与技术*, 2018, 7(5): 765-782. DOI: [10.12028/j.issn.2095-4239.2018.0083](https://doi.org/10.12028/j.issn.2095-4239.2018.0083).
- DAI X J, WEI K P, ZHANG X Z, et al. A review on flywheel energy storage technology in fifty years [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2018, 7(5): 765-782. DOI: [10.12028/j.issn.2095-4239.2018.0083](https://doi.org/10.12028/j.issn.2095-4239.2018.0083).
- [11] 隋云任. 飞轮储能辅助600MW燃煤机组调频技术研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.000692](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.000692).
- 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. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.000692](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.000692).
- [12] 周皓, 李军徽, 葛长兴, 等. 改善风电并网电能质量的飞轮储能系统能量管理系统设计 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(3): 105-113. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-1163](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-1163).
- ZHOU H, LI J H, GE C X, et al. Research on improving power quality of wind power system based on energy management system of flywheel energy storage system [J]. *Acta Energiac Solaris Sinica*, 2021, 42(3): 105-113. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-1163](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-1163).
- [13] 黄登超. 300MW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. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.001593](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.001593).
- 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. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.001593](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.001593).
- [14] 王江波, 赵国亮, 蒋晓春, 等. 飞轮储能技术在电网中的应用综述 [J]. *电力电子技术*, 2013, 47(7): 28-30. DOI: [10.3969/j.issn.1000-100X.2013.07.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-100X.2013.07.010).
- WANG J B, ZHAO G L, JIANG X C, et al. Overview on application of flywheel energy storage technology in power grid [J]. *Power Electronics*, 2013, 47(7): 28-30. DOI: [10.3969/j.issn.1000-100X.2013.07.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-100X.2013.07.010).
- [15] 王巍, 高原, 姜晓弋. 飞轮储能技术发展与应用 [J]. *船电技术*, 2013, 33(1): 31-34. DOI: [10.13632/j.meee.2013.01.016](https://doi.org/10.13632/j.meee.2013.01.016).
- WANG W, GAO Y, JIANG X Y. Developments and applications of flywheel energy storage technology [J]. *Marine Electric & Electronic Engineering*, 2013, 33(1): 31-34. DOI: [10.13632/j.meee.2013.01.016](https://doi.org/10.13632/j.meee.2013.01.016).
- [16] 杨忠生. 飞轮储能控制系统的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- YANG Z S. Study on flywheel energy storage control system [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.
- [17] 夏清. 太阳能飞轮储能系统充放电研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019. DOI: [10.27671/d.cnki.gcjtc.2019.000847](https://doi.org/10.27671/d.cnki.gcjtc.2019.000847).
- XIA Q. Study on charge and discharge of solar flywheel energy storage system [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019. DOI: [10.27671/d.cnki.gcjtc.2019.000847](https://doi.org/10.27671/d.cnki.gcjtc.2019.000847).
- [18] 毕文骏. 基于飞轮储能的地铁再生制动能量利用研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- BI W J. The study of subway braking energy utilization based on flywheel energy storage [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [19] 姚远. 应用于风力发电机组的飞轮储能系统建模与仿真研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2017.
- YAO Y. Modeling and simulation of flywheel energy storage system applied in wind turbine [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2017.
- [20] 于苏杭, 郭文勇, 滕玉平, 等. 飞轮储能轴承结构和控制策略研究综述 [J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1631-1642. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0237](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0237).
- YU S H, GUO W Y, TENG Y P, et al. A review of the structures and control strategies for flywheel bearings [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1631-

1642. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0237](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0237).
- [21] 李乃安. 主动磁悬浮轴承专家PID控制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
LI N A. The research of expert PID control strategy in active electromagnetic bearings [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [22] WEI C S, SÖFFKER D. Optimization strategy for PID-Controller design of AMB rotor systems [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24(3): 788-803. DOI: [10.1109/TCST.2015.2476780](https://doi.org/10.1109/TCST.2015.2476780).
- [23] KANDIL M S, DUBOIS M R, BAKAY L S, et al. Application of second-order sliding-mode concepts to active magnetic bearings [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(1): 855-864. DOI: [10.1109/TIE.2017.2721879](https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2721879).
- [24] 陈亮亮, 祝长生, 王忠博. 电磁轴承高速飞轮转子模态分离-状态反馈解耦控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(18): 5461-5472. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.162066](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.162066).
CHEN L L, ZHU C S, WANG Z B. Decoupling control for active magnetic bearing high-speed flywheel rotor based on mode separation and state feedback [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(18): 5461-5472. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.162066](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.162066).
- [25] 赵皓宇, 祝长生. 电磁轴承刚性转子系统前馈解耦控制 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(9): 1777-1787. DOI: [10.3785/j.issn.1008-973X.2018.09.019](https://doi.org/10.3785/j.issn.1008-973X.2018.09.019).
ZHAO H Y, ZHU C S. Feedforward decoupling control for magnetically suspended rigid rotor system [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2018, 52(9): 1777-1787. DOI: [10.3785/j.issn.1008-973X.2018.09.019](https://doi.org/10.3785/j.issn.1008-973X.2018.09.019).
- [26] 汤继强, 隗同坤, 宁梦月, 等. 基于反馈线性化的MSCMG转子稳定控制 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(6): 1063-1072. DOI: [10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0401](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0401).
TANG J Q, WEI T K, NING M Y, et al. Stable control of MSCMG rotor based on feedback linearization [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(6): 1063-1072. DOI: [10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0401](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0401).
- [27] 赵宏凯, 蒋科坚. 基于RBF神经网络的电磁轴承基础激励主动控制研究 [J]. *机电工程*, 2020, 37(12): 1425-1431. DOI: [10.3969/j.issn.1001-4551.2020.12.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4551.2020.12.005).
ZHAO H K, JIANG K J. Active control for the base motion of active magnetic bearings based on RBF neural network [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020, 37(12): 1425-1431. DOI: [10.3969/j.issn.1001-4551.2020.12.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4551.2020.12.005).
- [28] 赵晗彤. 基于飞轮储能系统的光伏直流微电网电压控制方法的研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2016.
ZHAO H T. Research on voltage control methods of photovoltaic DC microgrid based on flywheel energy storage system [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2016.
- [29] 王妮妮. 飞轮储能转子结构分析及电力系统应用研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.001293](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.001293).
WANG N N. Rotor structure analysis and application in power system of flywheel energy storage [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2020. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.001293](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.001293).
- [30] HUTCHINSON A, GLADWIN D T. Optimisation of a wind power site through utilisation of flywheel energy storage technology [J]. *Energy Reports*, 2020, 6(Supp. 5): 259-265. DOI: [10.1016/j.egyr.2020.03.032](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.03.032).
- [31] 王磊, 杜晓强, 宋永端. 用于风电场的飞轮储能矩阵系统协调控制 [J]. *电网技术*, 2013, 37(12): 3406-3412. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2013.12.024](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2013.12.024).
WANG L, DU X Q, SONG Y D. Coordinated control of flywheel energy storage matrix system for wind farm [J]. *Power System Technology*, 2013, 37(12): 3406-3412. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2013.12.024](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2013.12.024).

作者简介:



徐宪龙

徐宪龙(第一作者)

1974-, 男, 河北霸州人, 学士, 高级工程师, 主要从事火电厂安全生产技术管理工作(email)16040077@ceic.com。



魏书洲

魏书洲(通信作者)

1981-, 男, 湖北十堰人, 硕士, 高级工程师, 主要从事火电厂生产技术管理工作(email)shuzhou.wei@ceic.com。

(编辑 叶筠英)