

[飞轮储能]

飞轮储能在新能源项目一次调频场景下的经济性研究

文/唐亮 丁汇 刘颖杰
中海油新能源二连浩特风电有限公司

根据国家新能源政策、可再生能源发展现状及电源侧调频政策要求，选定实践中具有较强匹配性的飞轮储能技术进行研究，阐述了飞轮储能技术路径、工作原理、设备构造及相关技术在国内外主要场景中的应用。建立飞轮储能的物理模型与全生命周期经济评估模型。在中海油新能源二连浩特风电有限公司牵头承担的2020年度内蒙古科技重大专项（2020ZD0017）“MW级飞轮储能关键技术研究”项目中，对二连浩特99MW风电项目配备飞轮混合储能项目进行可行性分析，以山西省为例进行飞轮储能项目经济可行性研究分析，得出飞轮储能具备满足新能源项目一次调频的能力，在确定一定边界条件下，飞轮储能项目具备经济可行性。

截至目前，我国可再生能源装机容量已突破16.5亿kW，占全国发电总装机比例过半，一方面彰显了持续推动绿色低碳能源转型的决心；另一方面也表明电网的调频负荷会随之增加。

风电、光伏新能源发电项目出力受气象数据影响颇深，整体出力情况呈现不稳定性、波动性和随机性的特点，随着风电、光伏新能源项目不断增加，势必会加剧对电源端、负荷端的不平衡风险。为稳定电网频率，发电场频率变化超过一次调频死区后应及时进行调整。

2020年随着电力系统安全稳定导则（GB38755）^[1]及各省份两个细则考核规则的逐步印发，要求并网发电设备机组必须应具有一次调频的功能。2021年我国发布一次调频技术规定及试验导则，明确接入35 kV及以上电压等级的并网风电、光伏项目应具备一次调频功能，满足-10%~+6%运行功率调频能力的要求。同年，国家能源局发布电力辅助服务管理办法，鼓励通过竞争方式确定承担有偿电力辅助服务的并网主体。

由此可见，国家已从政策层面强制要求新能源发电项目具备一次调频功能。如无法实现，则需支付一次调频辅助服务费。实践中，飞轮储能技术是解决一次调频的最优方案，故本文聚焦飞轮储能技术在一次调频中的研究及应用进行阐述^[2-3]。

飞轮储能技术特点及应用

1. 飞轮储能技术概述

（1）工作原理

飞轮储能是一个纯物理反应过程，主要涉及电能的存储和释放。储能时外界电能通过电力转换器驱动电动机运行，电动机带动飞轮转子加速旋转直至达到额定转速，飞轮以动能的形式把能量储存起来，完成电能到机械动能的转换，能量储存在高速旋转的飞轮转子中。放电时，当接收到能量释放信号时，高速旋转的飞轮拖动电动机发电，经电力转换器输出适用于负载的电流和电压，由机械动能转换为电能，同时飞轮的转速不断下降，通过控制系统监测电网负荷和电源之间的差异，精确控制飞轮

的加速和减速,保持电网的稳定和平衡^[4]。飞轮转动时的动能为

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (1)$$

式中, E 为动能; J 为转动惯量; ω 为旋转角速度。

由此可见动能与飞轮转子的转动惯量成正比,而转动惯量与飞轮转子的直径和质量成正比,但体积过大、质量过重的飞轮转子在超高速转的过程中,会产生巨大的离心作用,考虑到设备的安全可控性,对飞轮转子的取材要求极高,需控制其极限强度。

(2) 设备构造

飞轮储能装备通过电动/发电双向互逆式电动机,实现机械动能和电能之间进行互换。飞轮储能主体结构主要由飞轮转子本体、中心轴承、电动机、电力转换器和真空容器等主要组件构成,如图1所示。

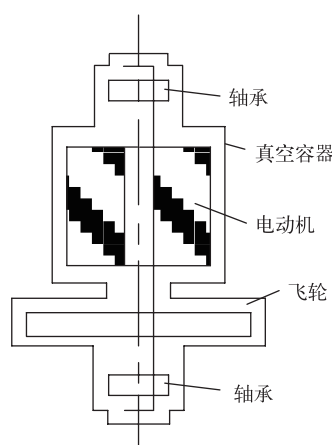


图1 飞轮储能装备结构示意图

2. 技术特点

相对于传统的电化学储能,飞轮储能具有以下特点^[5]: ①耐用可使用周期长,不受频繁充放电的影响,容量无衰减,循环使用寿命较长,理论寿命超过20年; ②功率密度较高、能实现瞬时充放电且不受次数限制,频次效率高,属于分秒级别大功率物理储存能量的技术,能实现毫秒级响应速度; ③循环成本较低,其运行过程中无有害物质产生,磁悬浮和真空环境大幅降低了飞轮储能装置运行时的机械损耗,运行过程中几乎不需要维护成本; ④环境适应性好,可适应的温度范围为-30~50℃,无需配备空调、除湿等辅助设备; ⑤能量转换效率高,

电能与动能间的能量转换效率高于95%,储能系统综合利用效率近90%; ⑥精确测量和控制系统,飞轮储能可精确测量转子转速从而精确计算出“剩余电量”实现精确控制; ⑦安全可靠,98%以上的设备材料都是钢材,运行时无化学物质释放,不存在化学爆炸风险; ⑧残值高,废旧和退役的飞轮储能设备可直接回收利用,二次回收成本低,全生命周期运行后的残值约30%; ⑨飞轮储能生命周期长,项目在整个运营周期内的总体成本相对较低,项目整体的经济性较好。

3. 飞轮储能技术在国、内外主要场景中的应用

飞轮储能技术主要出现在国内外四大应用场景中: 数据中心。轨道交通和航空航天领域,并逐步应用在调频场景中。

电源侧及用电侧的不平衡给电网频率带来一定的波动,为平衡波动,电网需配置调频电站,飞轮储能充放电效率高,能有效地进行有功和无功补偿,平衡波动负荷,对支撑电网频率和电压稳定性起到很好的作用。

飞轮储能系统建模

1. 飞轮储能参与一次调频物理模型

若飞轮转速的上下限分别为 $\omega_{\max}$ 与 $\omega_{\min}$,能量转换过程损失为 E_{loss} ,则其可释放与吸收的能量 E_d 与 E_c 为^[6-7]

$$\begin{cases} E_d = \frac{1}{2} J (\omega_i^2 - \omega_{\min}^2) - E_{\text{loss}} \\ E_c = \frac{1}{2} J (\omega_{\max}^2 - \omega_i^2) + E_{\text{loss}} \end{cases} \quad (2)$$

当飞轮储能协助新能源场站进行一次调频时,其转速应稳定在 (ω_l, ω_h) 区间内。将其等效做电池,则其荷电状态上下限为

$$\begin{cases} \text{SOC}_h = \frac{\omega_h^2 - \omega_{\min}^2}{\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2} \times 100\% \\ \text{SOC}_l = \frac{\omega_l^2 - \omega_{\min}^2}{\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2} \times 100\% \end{cases} \quad (3)$$

2. 飞轮储能全寿命周期经济评估模型

(1) 飞轮储能全寿命周期成本模型

飞轮储能项目的成本不仅包括初始投资成本,还需要考虑飞轮储能全寿命内的运行维护成本等费用。因此需要对飞轮储能的全寿命周期成本进行评估,主要包括初始投资成本、运行维护成本。

初始投资成本 C_{inv} 由功率投资成本与容量投资成本组成,表达式为

$$C_{\text{inv}} = c_{\text{inv},P} P_{\text{rated}} + c_{\text{inv},E} E_{\text{rated}} \quad (4)$$

式中, $c_{\text{inv},P}$ 为单位功率投资成本,与功率转换系统有关; P_{rated} 为飞轮储能的额定功率; $c_{\text{inv},E}$ 为单位容量投资成本,与飞轮储能设备有关; E_{rated} 为飞轮储能的额定容量。

运行维护成本 C_{op} 由功率运维成本与容量运维成本组成,由于储能设备在整个寿命周期内无需更换,因此容量运维成本较小,可以忽略不计。 C_{op} 表达式为

$$C_{\text{op}} = c_{\text{op},P} P_{\text{rated}} + c_{\text{op},E} E_{\text{rated}} \approx c_{\text{op},P} P_{\text{rated}} \quad (5)$$

式中, $c_{\text{op},P}$ 为单位功率运维成本; $c_{\text{op},E}$ 为单位容量投资成本,通常为0。

运行维护成本按年产生,需要折算为现值,其表达式为

$$NC_{\text{op}} = c_{\text{op}} \frac{(1+r)^{T_{\text{LCC}}} - 1}{r(1+r)^{T_{\text{LCC}}}} \quad (6)$$

式中, NC_{op} 为折算后现值; r 为贴现率; T_{LCC} 为飞轮储能的全寿命周期。

则飞轮储能的全寿命周期成本 C_{LCC} 为

$$C_{\text{LCC}} = C_{\text{inv}} + NC_{\text{op}} \quad (7)$$

(2) 飞轮储能参与一次调频收益模型

飞轮储能参与一次调频除提供调频辅助服务的收益外,还可以减少新能源场站因调频要求产生的自限电损失,因此其收益包含一次调频收益与减少自限电电量收益两部分。

一次调频收益 I_f 表达式为

$$I_f = n_f p_f D_f \quad (8)$$

式中, n_f 为平均一次调频次数,单位为次/天; p_f 为调频里程出清价格,单位为元/MW; D_f 为平均调频里程。

减少自限电电量收益 I_d 表达式为

$$I_d = \eta_d p T_n P_n \quad (9)$$

式中, η_d 为自限电比例; p 为补贴电价, T_n 为配置飞轮储能的新能源场站发电利用小时数; P_n 为其额定功率。

将收益年值折算至现值 NI 为

$$NI = \sum_t \frac{I_f + I_d}{(1+r)^t} \quad (10)$$

式中, t 为运行年。

(3) 飞轮储能经济评估模型

飞轮储能的收益净现值 N 为

$$N = NI - C_{\text{inv}} - NC_{\text{op}} \quad (11)$$

可以得到投资回收年限 T_{ph} 为

$$T_{\text{ph}} = \frac{-\ln(1 - \frac{rC_{\text{inv}}}{I_f + I_d - C_{\text{op}}})}{\ln(1+r)} \quad (12)$$

以项目为例的飞轮储能可行性分析

1. 项目概况

(1) 项目基本情况

中核汇海二连浩特99 MW风电项目(以下简称“此风电项目”)位于内蒙古自治区锡林郭勒盟,配备3台1 MW飞轮储能阵列及3 MW·h锂电池化学储能^[8-9]。

(2) 属地电网有关要求

此风电项目属于蒙西电网管辖范围,根据蒙西电网的要求,风电场应采用增加配置储能设备和快频控制装置的方式实现一次调频功能,性能要求:一次调频死区小于0.05 Hz,调节负荷最大幅度应不小于风电场总装机容量的10%,且不出现风电机组停机或脱网的现象。

2. 新能源场站一次调频参数设置要求

新能源一次调频功能技术要求中对调频范围、速率和准确度等均进行了约定,其中频率下扰时一次调频响应限幅不应小于新能源场站额定出力的6%,频率上扰时一次调频响应限幅不应小于新能源场站额定出力的10%。当电网高频扰动情况下,有功功率降至额定出力的10%时可不再向下调节。

3. 此风电项目飞轮混合储能方案的经济性分析

(1) 此风电项目飞轮混合储能经济性研究

本方案可实现风电项目一次调频,并能够避免为实现向上调频长年自限电6%的电量损失,按照风电场年等效利用小时数2 300 h,补贴电价0.51元/kW·h计算,减少长年自限电6%可增加风电场年收入约700万元。另外本项目还开发出负荷曲线跟随功能,通过飞轮的快速响应和3 MW电化学储能的消峰填谷功能,按照3 MW电化学储能每天充满满放67%效率核算,可给风电场年均增加2 MW的发电能力,按照2 MW×2 300 h×0.51元/(kW·h)计算,每年增加风电场收入约230万元,考虑到一

次调频功能优先,需要闭锁其他功能,负荷曲线跟随功能产生的230万元收益保守取值100万元。以上两项功能共可为风电场增加收入800万元,项目初始投入约1 290万元,项目投资回收期在2年左右,故混合储能系统保证了电网安全稳定运行而且收益可观。

(2) 技术整改方案比选

蒙西电网要求2024年底要完成所有新能源电站的一次调频整改,根据对二连浩特99 MW风电场一次调频设备采取两种方案进行对比分析,如图2所示。

方案一:每台风机进行一次调频整改,所涉及设备改造费为单台风机20万元,AGC 30万元,共计1 350万元。此方案无法解决向上调频的问题,故考虑6%的自限电比例,年损失约为600~700万元;方案二:采用二连浩特3 MW飞轮/3 MW锂离子化学混合储能调频方案,3 MW飞轮储能900万元,3 MW锂离子电池储能360万元,AGC设备30万元,共1 290万元,此方案具备向上调频功能,可以冲减6%自限电部分所带来的电量损失,即600~700万元。

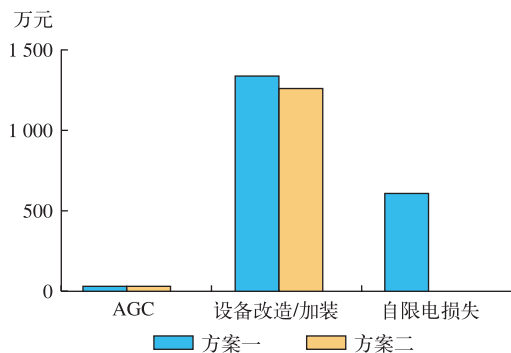


图2 一次调频技术方案经济对比

经对比,方案二比方案一的设备改造费用节省60万元,且能节约电网损失600~700万元,共计最低节省约660~760万元,方案二的经济性更好。故实践中飞轮储能对有助于提升新能源项目一次调频能力,且具有良好的经济可行性。

以省域为例的飞轮储能项目经济可行性分析

1. 相关政策

(1) 国家层面的一次调频政策

国家发展改革委及国家能源局于2024年3月联

合发布了关于建立健全电力辅助服务市场价格机制的通知,考虑到电力系统安全稳定运行,保障电能质量,使用市场化的手段倒逼一次调频工作的有效落实,通知中明确调频里程出清价格上限不超过15元/MW,但未约定价格下限。

(2) 山西区域一次调频交易细则

山西能源监管办公室发布的独立储能电站参与电力市场一次调频时长交易实施细则,明确其市场主体是指获得准入的发电侧并网主体及新型储能,包括火、气、水、风、光电等发电侧主体及电化学、压缩空气、飞轮等新型储能。规定调频里程出清价格为5~10元/MW,山西细则的发布是全国首次明确独立储能电站可参与电力一次调频,可以作为一次调频市场交易主体,山西成为全国首个电力一次调频付费的区域。由于山西区域规定了调频里程出清的交易底价5元/MW,所以对于能完成一次调频功能的储能电站有了明确的收益标准,故选定山西区域进行飞轮储能项目可行性分析。

2. 山西区域新能源项目特点分析

山西省对电力一次调频的需求比其他省份更为迫切,作为能源大省,尤其风电已成为仅次于火电的第二大电源,新能源装机比重近40%,全省用电负荷大,但高品质、灵活性强的抽水蓄能、气电资源都比较少,传统电源提供的分钟级一次调频资源严重不足,高比例可再生能源装机的入网势必给电网带来较大的波动性。山西省电网结构比较复杂,拥有西电东送、北电南送、水火互济和特高压交直流混联的复杂电网结构。为了避免调频压力逐级转移,为电网安全性增加屏障,山西省亟需探索飞轮储能参与一次调频。

3. 山西区域飞轮储能项目经济可行性分析

(1) 假定条件下的收益分析

独立储能电站参与电力市场一次调频交易实施细则明确设定5~10元/MW的补偿标准,是基于储能参与一次调频的平均收益,相应成本由发电企业按当月上网电量分摊。按照1 MW飞轮储能项目进行成本核算,假设新能源项目平均每天触发1 000次一次调频,每天产生的一次调频费用为5 000元,每年产生的一次调频费用约180万,2年的营收约360万元,考虑设备折旧、少量运维费用等成本端按照10%的比例核算,基本上能实现50%

以上的收益率，回收期不超过2年，假设边界下具有较好的投资收益。

(2) 不同边界下可行性收益分析

根据测算可以看出，假定里程出清价格为5元/MW的条件下，项目收益率更多取决于新能源项目平均每天触发一次调频的次数，现就不同的一次调频次数进行了专项数据分析并形成统计表，见表1。并得到一次调频次数与投资回收期关系如图3所示。

由此可以看出，在保底里程出清价格5元/MW的情况下，新能源发电项目平均每天一次调频次数应达到500次以上，投资飞轮储能项目收益率能达到25%以上，回收期可控制在4年内；新能源发电项目平均每天一次调频次数低于500次，投资飞轮储能项目收益率低于25%，回收期超过4年的项目投资风险将大大增加。

表1 一次调频次数专项数据

平均一次调频次数/(次/天)	年营收/万元	年利润/万元	回收期/年	IRR (%)
100	18	16	18.3	5.48
200	37	33	9.1	10.95
300	55	49	6.1	16.43
500	91	82	3.7	27.38
800	146	131	2.3	43.80
1000	183	164	1.8	54.75
1500	274	246	1.2	82.13
2000	365	329	0.9	109.50

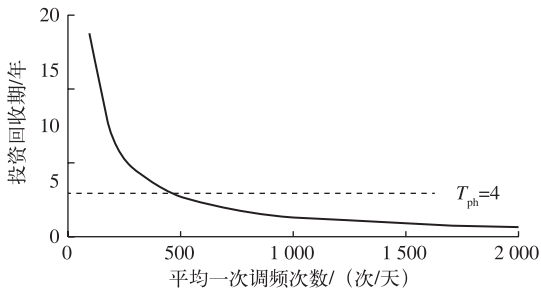


图3 一次调频次数与投资回收期关系

结束语

飞轮储能技术具备满足新能源项目一次调频能力：飞轮储能技术具有调节响应速度快，在毫秒

级就能实现精准的充放电需求，使用寿命长，安全环保等特点，可满足电网短时高频次的一次调频需求，具备满足新能源项目一次调频和惯量支撑能力。

当前新能源发电项目都要考虑到电网安全稳定性的，属地电网及政府均提出需配备一定比例储能的要求。通过本论文的研究数据，在新能源发电项目装机占比较大的省份，新能源发电项目平均每天一次调频次数达到500次以上且调频里程出清价格不低于5元/MW的省份可以考虑对飞轮储能进行投资，组合投资将对新能源发电项目的收益率有促进作用。EA

(收稿日期：2024-05-24)

参考文献

[1] 电力系统安全稳定导则：GB 38755—2019[S].
[2] 戴兴建，姜新建，张凯. 飞轮储能系统技术与工程应用[M]. 北京：化学工业出版社，2021.
[3] 童家麟，洪庆，吕洪坤，等. 电源侧储能技术发展现状及应用前景综述[J]. 华电技术，2021，43(7)：17-23.
[4] 马进，王闯. 风力发电对电力系统一次调频的影响及解决措施[J]. 科技创新与应用，2021，11(31)：76-79.
[5] 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.
[6] 陈玉龙. 应用于风电场的飞轮储能系统充放电控制研究[D]. 北京：华北电力大学，2021.
[7] 罗耀东. 飞轮储能参与电网一次调频控制方法研究[D]. 济南：山东大学，2021.
[8] 李树胜，王佳良，李光军，等. MW级飞轮阵列在风光储能基地示范应用[J]. 储能科学与技术，2022，11(2)：583-592.
[9] 张继红，崔天祥，熊伟，等. 飞轮储能参与风场调频控制研究[J]. 浙江电力，2022，41(8)：49-56.