

DOI: 10.19666/j.rlfed.202308131

飞轮储能辅助火电一次调频技术与应用

代本谦¹, 兀鹏越¹, 王海波², 苏森³, 王飞⁴, 朱艳通²,
潘海波¹, 李慧眸子², 田建东²

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2.国能宁夏灵武发电有限公司, 宁夏 灵武 751400;

3.华驰动能(北京)科技有限公司, 北京 101100;

4.华能国际电力股份有限公司日照电厂, 山东 日照 276800)

[摘要] 大规模新能源并网造成电网频率波动增大, 使得火电机组调频任务繁重、动作频繁, 加剧了机组老化, 飞轮储能辅助火电机组调频能提升机组的调频性能。论述了飞轮储能辅助火电机组一次调频原理, 分析了飞轮储能的出力特性, 结合世界最大容量飞轮储能, 提出了飞轮储能满功率辅助火电机组一次调频的控制策略, 并应用于我国第一套飞轮储能辅助火电机组一次调频的调试中, 验证了控制策略有效性。现场测试结果表明, 飞轮储能辅助火电机组一次调频性能良好, 采取所提一次调频策略后该机组一次调频动作合格率提升 21.26%, 一次调频积分电量贡献指数提升 3.45 倍。飞轮储能辅助火电机组一次调频模式对解决此类问题具有一定指导意义。

[关键词] 飞轮; 一次调频; 储能; 工程应用

[引用本文格式] 代本谦, 兀鹏越, 王海波, 等. 飞轮储能辅助火电一次调频技术与应用[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 81-88.
DAI Benqian, WU Pengyue, WANG Haibo, et al. Primary frequency modulation technology of flywheel energy storage assisted thermal power plant[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 81-88.

Primary frequency modulation technology of flywheel energy storage assisted thermal power plant

DAI Benqian¹, WU Pengyue¹, WANG Haibo², SU Sen³, WANG Fei⁴, ZHU Yantong²,
PAN Haibo¹, LI Huiyezi², TIAN Jiandong²

(1.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2.Guoneng Ningxia Lingwu Power Generation Co., Ltd., Lingwu 751400, China;

3.Huachi Kinetic Energy Beijing Technology Co., Ltd., Beijing 101100, China;

4.Huaneng International Power Co., Ltd. Rizhao Power Plant, Rizhao 276800, China)

Abstract: The large-scale integration of new energy into the grid has caused increased frequency fluctuations in the grid, making the frequency modulation task of thermal power units heavy and frequent, exacerbating the aging of the unit, flywheel energy storage assisted thermal power unit frequency modulation can improve the frequency modulation performance of the unit. The principle of primary frequency modulation of flywheel energy storage auxiliary unit is discussed, and the flywheel energy storage's frequency modulation characteristics are analyzed. Combining with the world's largest capacity flywheel energy storage, the full power control strategy for primary frequency modulation of flywheel energy storage auxiliary units is proposed, and applied to the shakedown test of China's first set of flywheel energy storage auxiliary thermal power unit's primary frequency modulation to verify the effectiveness of the control strategy. The field test results show that, the primary frequency modulation performance of the flywheel energy storage auxiliary thermal power unit is good. After the proposed primary frequency modulation strategy is adopted, the qualification rate of the primary frequency modulation action of the unit increases by 21.26%, and the integral electricity contribution index of the primary frequency modulation increases by 3.45 times. The primary frequency modulation mode of flywheel energy storage auxiliary thermal power unit has certain guiding significance to solve such problems.

收稿日期: 2023-08-03

第一作者简介: 代本谦(1996), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为火电储能调频应用技术, dbq6847@163.com。

Key words: flywheel; primary frequency modulation; energy storage; engineering application

火电机组作为主要传统调频电源,在电力系统中承担着主要的调频任务^[1-2]。但火电机组存在热力系统惯性大、响应慢的缺点,导致调频性能不够理想^[3-5]。近年来,在发电厂加入新型储能系统,利用其调节速率快、调节精度高和响应时间短的优点,将储能耦合火电机组作为一个整体来响应电网的 AGC 指令,能够显著提升火电机组整体 AGC 性能,获取辅助服务补偿收益,具有很好的经济效益,因而得到了快速发展^[6-8]。

目前,储能耦合火电机组调频项目中,绝大部分采用锂电池技术路线。锂电池作为应用最广的储能方式,在安全性能、寿命、环保方面存在欠缺^[9-10],为克服以上问题,超级电容和飞轮等新型储能技术与火电机组耦合调频得到了广泛研究^[11-16]。黄登超^[17]应用仿真研究了飞轮储能辅助供热机组调频,结果表明飞轮储能辅助供热机组调频都取得较好的调频效果,大幅降低了响应时间和调频时间,同时消除了机组的静态偏差。隋云任等^[18]搭建了飞轮储能装置辅助燃煤机组调频系统仿真,发现飞轮储能系统辅助燃煤机组调频对提高调频质量有利。何林轩等^[19]建立两区域电网模型,利用 MATLAB/Simulink 软件验证了飞轮储能辅助火电机组一次调频能减轻火电机组调频负担。

上述研究仿真验证了飞轮储能辅助机组调频的可行性,但此前国内在工程领域尚无飞轮储能辅助机组调频实际案例。国能宁夏灵武发电(国能灵武)有限公司 2023 年 5 月建成的 22 MW 飞轮储能辅助机组调频项目,是国内首个储能耦合火电一次调频的“飞轮储能-火电联合调频”工程,也是全球单体功率最大、储能总功率最大的飞轮储能项目。

介绍了国能灵武 22 MW 飞轮耦合火电机组调频技术及工程方案,分析了飞轮的功率和电量特性,并进行现场测试验证,在此基础上提出了飞轮储能辅助机组一次调频的策略,并对该策略下火电机组一次调频运行情况进行分析,结果显示能够大幅提升机组一次调频性能,具有良好的经济性。

1 飞轮储能辅助火电机组一次调频技术

1.1 飞轮储能简介

飞轮储能是一种将电能机械能相互转化的储能方式,利用转子把电能以机械能的方式储存起

来,充能时永磁同步电机(作为电动机)带动转子转动储存能量,放能时飞轮转子带动永磁同步电动机(作为发电机)发出电能^[20-22]。近期研制成功的大电量储能飞轮,是指储电量在 100 kW·h 以上的大电量飞轮设备,其寿命长,充放电次数高达千万次,切合一次调频高频次的需求。国能灵武辅助火电机组一次调频的飞轮单体的具体参数见表 1。

表 1 飞轮单体参数
Tab.1 Parameters of flywheel monomer

项目	数值
单体额定功率/kW	500
单体额定储电量/(kW·h)	125
额定负荷输出时长/min	15
额定转速/(r·min ⁻¹)	5 200
响应速度	毫秒级
寿命	1 000 万次
自耗电率/%	0.3~0.5

1.2 火电机组一次调频

火电机组的一次调频是指当电力系统频率偏离死区频率时,发电机的调速系统自动反应,调整机组有功出力使频率恢复到死区内。电网频率 f 在 (50 ± 0.03) Hz 时属于死区,当电网频率高于 50.03 Hz 时,火电机组应减少出力;当电网频率 f 低于 49.97 Hz 时,火电机组需增加出力。衡量机组一次调频性能指标如下。

1) 一次调频实际贡献积分电量

一次调频理论贡献积分电量^[23] H_e 计算式为:

$$H_e = \int_{t_1}^{t_2} (P_e(t) - P_0) dt \quad (1)$$

式中: t_1 、 t_2 分别为一次调频的起始和结束时刻; $P_e(t)$ 为机组一次调频时在 t 时刻的理论输出, MW; P_0 为调频起始时刻机组的实际出力, MW。

则一次调频实际贡献积分电量计算式为:

$$H = \int_{t_1}^{t_2} (P_g(t) - P_0) dt \quad (2)$$

式中: $P_g(t)$ 为 t 时刻机组实际输出, MW。

2) 一次调频积分电量响应指数

$$I = \frac{H}{H_e} \times 100\% \quad (3)$$

响应指数 I 是指以频差大于动作死区开始,频率开始恢复结束,在此期间一次调频实际积分电量和一次调频理论积分电量之比。

3) 一次调频动作合格率

$$q = (1 - \frac{N}{M}) \times 100\% \quad (4)$$

式中: N 为机组一次调频动作评价不合格次数; M 为一次调频理论动作次数; 一般要求合格率大于 70%。

大部分地区电网一次调频属于无偿辅助服务, 电网调度部门只对其性能进行考核。但西北地区电网一次调频属于有偿辅助服务^[24], 积分电量补偿标准为 15 元/(kW·h), 对于一次调频性能优秀的机组, 可以获取可观的补偿收益。因此, 提高机组一次调频性能对发电企业经营具有重要意义。

1.3 飞轮储能辅助火电机组一次调频技术

由于火电机组惯性大、响应慢, 机组的响应曲线 P_g 往往低于理论曲线 P_e , 从而导致火电机组一次调频积分电量响应指数 I 不高。通过在火电机组接入储能装置, 利用储能和机组共同响应电网频率波动, 可以显著提高机组的调频性能。储能辅助火电机组一次调频曲线如图 1 所示。

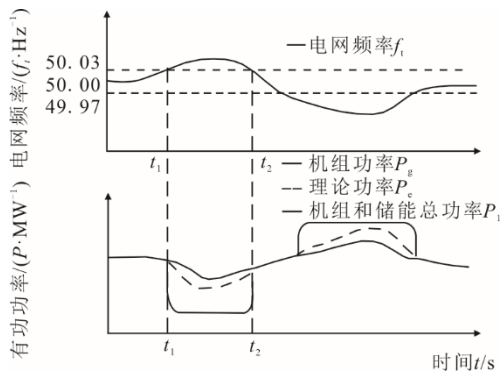


图 1 飞轮储能辅助火电机组一次调频曲线
Fig.1 Curve of primary frequency modulation for flywheel energy storage assisted thermal power units

增加储能后, 机组一次调频实际贡献积分电量 H_1 及响应指数 I_1 为:

$$H_1 = \int_{t_1}^{t_2} (P_g(t) + P_{FESS}(t) - P_0) dt > H \quad (5)$$

$$I_1 = \frac{H_1}{H_e} \times 100\% > I \quad (6)$$

式中: $P_{FESS}(t)$ 为飞轮储能在 t 时刻的输出功率, MW。

可见, 在火电机组接入飞轮储能系统与机组同时响应一次调频, 机组和储能的总功率将会高于一次调频的理论功率, 一次调频积分电量响应指数 I_1 远高于 100%, 一次调频动作合格率提升, 机组一

次调频指标显著提高, 经济效益大幅增加。

1.4 飞轮辅助机组一次调频工程方案

1.4.1 储能接入的电气一次方案

本文火电机组的装机容量为 600 MW, 飞轮系统额定容量为 22 MW/4.5 MW·h, 4 台飞轮为 1 组, 分为 9 组, 共 36 台飞轮单体组成电气一次系统。

飞轮储能辅助机组调频的一次系统如图 2 所示。飞轮储能分为 A、B 2 段, 其中 A 段配置 3 套飞轮储能组 7 MW/1.5 MW·h, B 段配置 6 套飞轮储能组 15 MW/3 MW·h, 飞轮储能组通过储能箱变升压至 6 kV, 经高压开关接入高压厂用电母线。飞轮储能的运行方式灵活, 储能 A 段、B 段分别接入 1 号机、2 号机的厂用 I 段、厂用公用段。储能 A、B 2 段可以作为一个整体辅助 1 号机或者 2 号机参与调频, 也可以分别辅助 2 台机组参与调频。当储能发生内部故障时, 只需断开高压开关, 不影响发电机端、厂用辅助设备的正常运行。

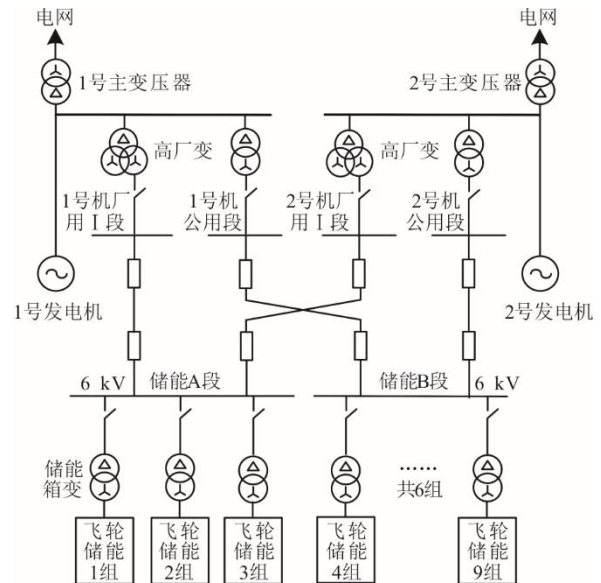


图 2 飞轮储能接入机组一次系统
Fig.2 Primary diagram of system connected to flywheel energy storage

1.4.2 储能接入的电气二次方案

电网调度对机组一次调频性能考核是通过同步相量测量装置 (phasor measurement unit, PMU) 上送至电网广域测量系统 (wide area measurement system, WAMS) 来实现^[25]。在接入飞轮储能前, 调度对电厂的一次调频测量点为机组出口功率 P_g 。飞轮储能接入厂用变低压侧后, 为监测飞轮储能辅助机组一次调频所做的贡献, 需要新增一套 PMU

设备采集飞轮储能功率 P_{FESS} ，并与机组功率 P_g 合成为机组和飞轮储能总功率 P_1 并上传调度，实现飞轮储能辅助机组一次调频。改造后飞轮储能辅助机组一次调频电气原理如图3所示。

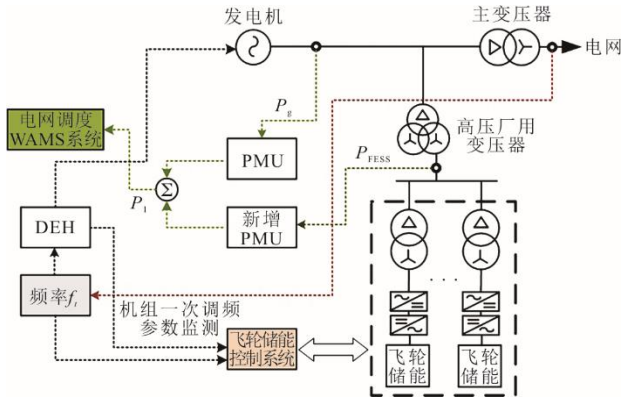


图3 飞轮储能辅助机组一次调频原理
Fig.3 Principle of primary frequency modulation for flywheel energy storage auxiliary units

一次调频实现的具体过程为：飞轮储能控制系统实时监测电网频率参数 f_i ，根据电网频率变化控制储能系统的输出功率。当“机组+储能”功率 P_1 等于理论功率 P_e 时，一次调频积分电量响应指数为100%。此时机组按照原有工作方式运行，不改变汽机、锅炉等运行状态，飞轮储能控制系统计算机组功率 P_g 与理论功率 P_e 的差值，该差值为飞轮储能的出力功率 P_{FESS} 。

在电网调频辅助服务考核系统允许的情况下，为了获取更多的积分电量，在一次调频动作时应使储能全功率输出，使得一次调频积分电量响应指数 I 远大于100%，从而实现更好的调频收益。飞轮储能出力功率 P_{FESS} 从机组功率 P_g 与理论功率 P_e 的差值增大为飞轮储能当前状态下所能提供的最大功率。

2 飞轮的功率和电量特性分析

根据西北电网调频辅助服务规则，实现一次调频收益最大化的关键是实现一次调频积分电量的最大化。为此，需要根据飞轮的功率特性和电量特性来选择最优的运行区间，即在一次调频动作期间，飞轮以最大的功率输出，从而制定出满功率出力策略，实现最多的积分电量。

2.1 飞轮的功率特性

1) 启动阶段

由零转速开始充电启动时，由于飞轮转动惯量很大，系统会有较长时间位于零转速附近运行。转

速0~600 r/min 是飞轮启动过程。这段过程由于转速和精度难以准确控制，因此这部分电量弃之不用。

2) 恒转矩加速阶段

从600 r/min 开始进入恒转矩加速阶段。这个过程中，输入的电压和频率是逐渐增大的，且 U/f 为常数，意味着电流为恒值，直到频率上升到基频时，本阶段结束。在整个过程中，飞轮输入功率是逐渐增加的，结束时转速为3600 r/min。

3) 恒功率加速阶段

当恒转矩加速阶段完成时，输入功率已经达到飞轮的额定功率。此后，输入功率一直保持恒额定功率，飞轮不断加速至最高转速5200 r/min，充电过程完成。放电过程与之相反。

飞轮充电特性功率 P_{ch} (kW)、放电特性功率 P_{disch} (kW) 与飞轮转速 n (r/min) 的关系为：

$$P_{\text{ch}} = \begin{cases} 30 & 100 < n < 600 \\ k \times n + b & 600 \leq n < 3600 \\ 500 & 3600 \leq n < 5200 \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{\text{disch}} = \begin{cases} -30 & 100 < n < 600 \\ -k \times n - b & 600 \leq n < 3600 \\ -500 & 3600 \leq n < 5200 \end{cases} \quad (8)$$

式中： k 为一次项的系数； b 为常数。经过实际数据线性拟合， $k=0.134$ ， $b=30.31$ 。

实测的飞轮充放电过程的转速、功率和转矩曲线如图4所示。

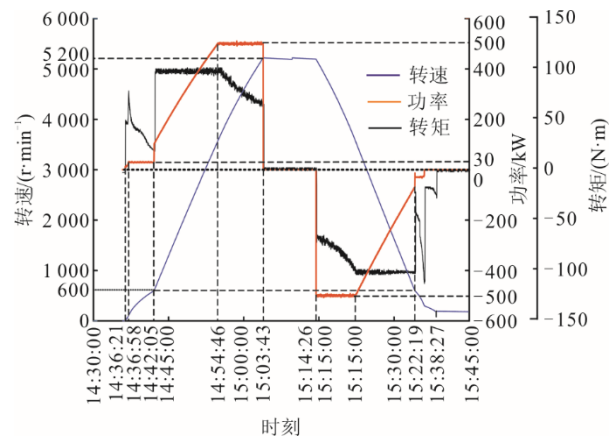


图4 启停时转速与功率、转矩关系
Fig.4 Relationship between and among speed, power and torque during startup and shutdown

2.2 飞轮的电量特性

飞轮储能的电量大小和转速的平方成正比，其电量表达式为：

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} J \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 = \frac{\pi^2 J}{1800} \times n^2 \quad (9)$$

式中： J 为飞轮转子的极转动惯量， $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ； ω 为飞轮转子的角速度， rad/s ； n 为飞轮转子的转速， r/min 。

整个充电过程中飞轮储能电量从 0 上升至 129 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。放电过程与充电过程相反。

将飞轮的电量用 SOC 表示：

$$\text{SOC} = \frac{n^2}{n_{\max}^2} \times 100\% \quad (10)$$

从飞轮电量特性可以得到当 $100 < n < 600$ 、 $600 < n < 3600$ 、 $3600 < n < 5200$ 时，SOC 范围为 $0 < \text{SOC} < 1\%$ 、 $1\% < \text{SOC} < 48\%$ 、 $48\% < \text{SOC} < 100\%$ ，则根据式(7)一式(10)，功率 300 kW 的起始 SOC 为 15%，飞轮 SOC 满功率充放电区间为 48%~100%。

实测的飞轮充放电过程的转速、电量曲线如图 5 所示。

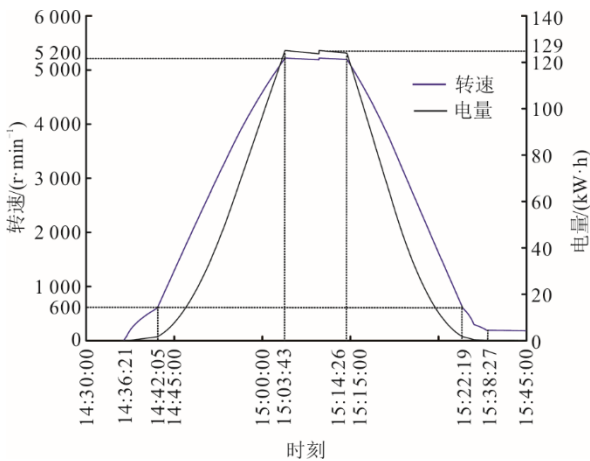


图 5 启停时转速与电量关系
Fig.5 Relationship between speed and electricity during startup and shutdown

2.3 飞轮辅助一次调频区间划分

飞轮储能参与辅助机组一次调频时，为了获取更多的积分电量，应控制飞轮储能以最大功率输出，增加一次调频辅助服务收益。为此，需根据飞轮的功率特性和电量特性对储能 SOC 区间进行划分，从而制定出飞轮满功率运行策略。

根据式(7)一式(10)，飞轮功率 300 kW 对应 SOC 为 15%，飞轮 SOC 满功率充放电区间为 48%~100%。考虑低电量时飞轮功率不高，满电量时参与调频动作只能放电，不利于飞轮连续工作、提升电厂的一次调频积分电量和性能，故将 SOC

区间 0~5%、和 95%~100%设置在工作区外。

飞轮储能单元电量设定 4 个区域，具体如图 6 所示。4 个区域划分的原则为：1) 工作在满功率充放电区间，最大限度提升一次调频积分电量；2) 高 SOC 区间禁止充电、低 SOC 区间禁止放电；3) 过渡 SOC 区间满足飞轮特性充放电。具体分以下情况：

- 1) 当飞轮 SOC 处于 A 区间，由于飞轮电量低，拒绝放电指令，接受充电指令；
- 2) 当飞轮 SOC 处于 B 区间，该区间飞轮充放电功率满足飞轮功率特性关系；
- 3) 当飞轮 SOC 处于 C 区间，为运行待机区间，飞轮充放电均为满功率 500 kW ，为最优状态响应调频指令；
- 4) 当飞轮 SOC 处于 D 区间，由于电量过高，拒绝充电指令，接受放电指令。

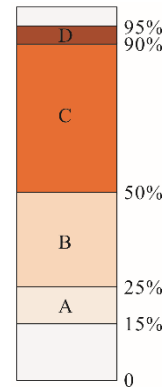


图 6 飞轮 SOC 分区
Fig.6 Flywheel SOC partition

考虑飞轮运行在满功率充放电区间，向上充电和向下放电留有裕度，将飞轮运行初始工作点设置在 SOC 为 60%。由于储能调频需要高功率调节，飞轮待机时，电量一般维持在 60%电量，原则上在 50%~90%电量范围内进行辅助调频。

2.4 飞轮储能一次调频策略

根据上述飞轮电量分区，可制定飞轮储能辅助火电机组一次调频策略，储能参与机组一次调频分为以下 3 种情况。

- 1) $|\Delta f| \leq 0.033 \text{ Hz}$ ，此时频率偏差信号小于等于死区设定值，为防止飞轮系统由于较小频率波动而频繁动作，在此种状态下飞轮储能不参与一次调频，若无储能自恢复触发，则处于闭锁状态，即飞轮储能功率为：

$$P_{\text{FESS}} = 0 \quad (11)$$

2) $\Delta f < -0.033$ Hz, 此时需要飞轮储能释放飞轮本体功率。当 $SOC \geq 50\%$ 时, 飞轮储能储电量充足, 可以按最大输出功率 500 kW 进行放电动作; 当 $SOC < 50\%$ 时, 飞轮储能储电量偏小, 已不适合再按最大放电功率工作, 此时飞轮储能实际输出功率将受到储能 SOC 的约束函数限制。飞轮储能放电功率为:

$$P_{FESS} = \begin{cases} P_{FESS,N} & , 50\% \leq SOC < 95\% \\ \alpha \times P_{FESS,N} & , 25\% < SOC < 50\% \\ 0 & , \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{FESS,N}$ 为飞轮储能满功率, 取 500 kW; α 为储能功率约束因子, 取 0.6。

3) $\Delta f > 0.033$ Hz, 此时需要飞轮储能充电吸收机组功率。当 $SOC \geq 50\%$ 时, 飞轮充电余量充足, 可以按最大充电功率 500 kW 进行充电动作。当 $SOC < 50\%$ 时, 飞轮储能储电量余量小, 已不适合再按最大充电功率工作, 此时飞轮储能实际充电功率将受到储能 SOC 的约束函数的限制。飞轮储能充电功率为:

$$P_{FESS} = \begin{cases} -P_{FESS,N} & , 50\% \leq SOC < 90\% \\ -\alpha \times P_{FESS,N} & , 15\% < SOC < 50\% \\ 0 & , \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

基于上述 3 种情况, 飞轮运行策略如图 7 所示。

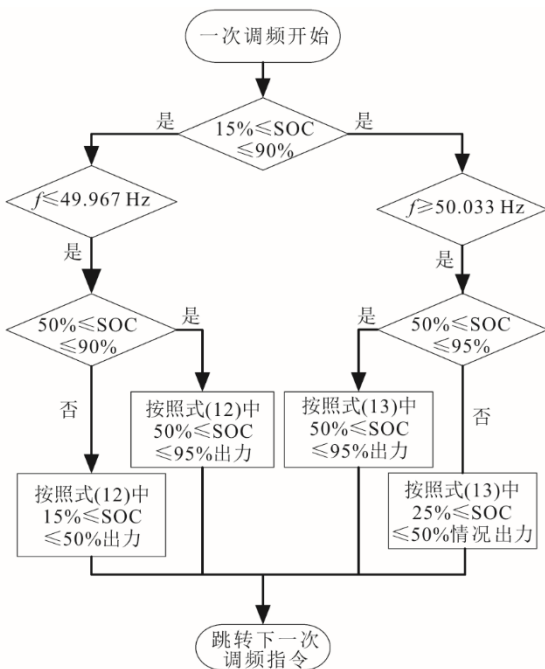


图 7 飞轮储能联合机组一次调频运行策略

Fig.7 The primary frequency modulation operation strategy for flywheel energy storage combined unit

3 飞轮储能辅助火电机组一次调频运行效果

3.1 飞轮储能辅助一次调频运行情况

飞轮储能辅助火电机组一次调频期间飞轮储能出力如图 8 所示。飞轮储能单元在参与一次调频时满功率充放电, 当电网频率不超出 50 ± 0.033 Hz 时, 飞轮不动作; 当频率超出 50 ± 0.033 Hz 时, 飞轮储能满功率输出。试运行期间总共 14 台飞轮储能单元响应一次调频动作, 单次响应功率为 $500 \text{ kW} \times 14 = 7\,000 \text{ kW}$ 。

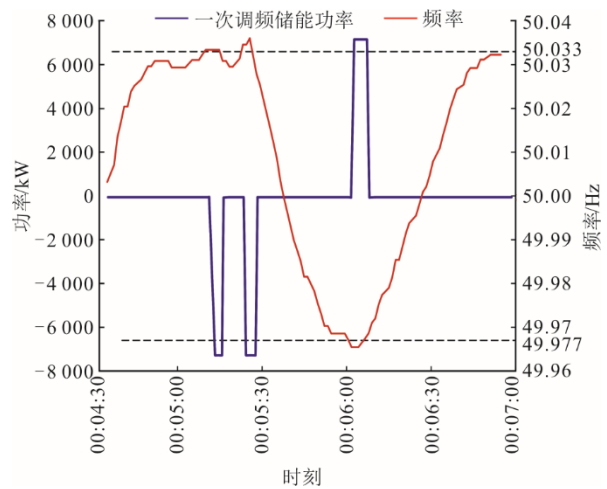


图 8 一次调频频率与飞轮出力关系

Fig.8 Relationship between primary frequency modulation frequency and flywheel output

3.2 飞轮辅助机组一次调频性能提升

3.2.1 一次调频动作合格率提升

储能投运后, 一次调频的合格率大幅提升。选取该电厂 2 号机组 10 月和 11 月 6 日—10 日的一次调频动作合格率数据分析, 具体如图 9 所示。10 月单机组参与一次调频, 机组一次调频动作合格率最低只有 63.90%, 最高达到 69.10%, 平均 67.42%, 合格率均小于 70%。11 月份 2 号机组在飞轮储能参与一次调频后, 飞轮辅助机组一次调频的平均动作合格率达到 88.68%, 比机组单独调频时提升 21.26%。

3.2.2 一次调频积分电量 (收益) 提升

储能系统未投入时, 统计 2 号机组一次调频积分电量及收益情况, 具体见表 2。一次调频积分电量响应贡献指数 I 平均为 136.18%, 日平均一次调频收益 10 184 元。

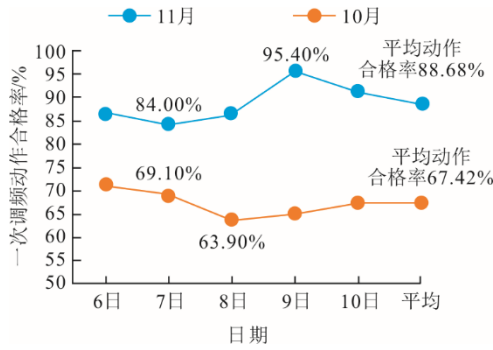


图9 2号机组一次调频动作合格率

Fig.9 Qualification rate of primary frequency modulation action of unit 2

表2 2号机组一次调频积分电量（储能未参与）

Tab.2 Analysis of integral electricity of primary frequency modulation of unit 2 (excluding energy storage)

日期	2号机组一次调频实际贡献电量/(kW·h)	2号机组一次调频理论贡献电量/(kW·h)	一次调频积分电量响应指数/%	一次调频辅助服务收益/元
10月6日	739.44	476.61	155.15	11 091.6
10月7日	547.52	443.55	123.44	8 212.8
10月8日	1 029.81	954.69	107.87	15 447.2
10月9日	647.68	524.20	123.55	9 715.2
10月10日	430.57	251.95	170.89	6 458.6

储能系统投入后，统计2号机组一次调频积分电量及收益情况见表3。一次调频积分电量响应贡献指数 I 平均为470.38%，一次调频积分电量响应贡献指数提升3.45倍，日平均一次调频收益25 421元，一次调频辅助收益提升2.5倍。

表3 2号机组一次调频积分电量分析（储能参与）

Tab.3 Analysis of integral electricity of primary frequency modulation of unit 2 (including energy storage)

日期	2号机组一次调频实际贡献电量/(kW·h)	2号机组一次调频理论贡献电量/(kW·h)	一次调频积分电量响应指数/%	一次调频辅助服务收益/元
11月6日	3 579.24	823.56	434.60	53 688.6
11月7日	2 312.29	636.40	363.40	34 684.4
11月8日	810.07	182.69	443.41	12 151.1
11月9日	945.91	147.43	641.61	14 188.7
11月10日	826.19	176.20	468.88	12 392.9

根据有关资料显示，本项目初始投资为8 890万元，年收益约2 000万元，静态回收期在5年以内，在当前的辅助服务市场中具有良好的投资回报率。

4 结 语

本文的研究结果证明，高功率、长寿命的大容量飞轮储能技术能够满足火电机组一次调频的需

求。现场运行数据表明，飞轮储能辅助机组一次调频使得机组一次调频动作合格率提升21.26%，一次调频积分电量贡献指数提升3.45倍，且具有良好的经济性。

[参 考 文 献]

- [1] 牟春华, 兀鹏越, 孙钢虎, 等. 火电机组与储能系统联合自动发电控制调频技术及应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 29-34.
- [2] 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.
- [3] 丁冬, 杨水丽, 李建林, 等. 辅助火电机组参与电网调频的 BESS 容量配置[J]. 储能科学与技术, 2014, 3(4): 302-307.
- [4] MILLER N W, SHAO M, VENKATARAMAN S, et al. Frequency response of California and WECC under high wind and solar conditions[C]//IEEE. IEEE, 2012.
- [5] ATTYA A B T, HARTKOPF T. Utilising stored wind energy by hydro-pumped storage to provide frequency support at high levels of wind energy penetration[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(12): 1485-1497.
- [6] 肖春梅. 电储能提升火电机组调频性能研究[J]. 热力发电, 2021, 50(6): 98-105.
- [7] 谢惠藩, 王超, 刘湃泓, 等. 南方电网储能联合火电调频技术应用[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 172-179.
- [8] 孙钢虎, 王小辉, 陈远志, 等. 储能联合发电机组调频经济效益分析[J]. 电源学报, 2020, 18(4): 151-156.
- [9] 王莉, 谢乐琼, 田光宇, 等. 锂离子电池安全事故: 安全性问题, 还是可靠性问题[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(1): 1-6.

- issues[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(1): 1-6.
- [10] 曹文灵, 雷博, 史尤杰, 等. 韩国锂离子电池储能电站安全事故的分析及思考[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(5): 1539-1547.
CAO Wenjing, LEI Bo, SHI Youjie, et al. Analysis and thinking on the safety accident of Lithium-Ion battery energy storage power station in South Korea [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(5): 1539-1547.
- [11] 王松岑, 来小康, 程时杰. 大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 3-8.
WANG Songcen, LAI Xiaokang, CHENG Shijie. An analysis of prospects for application of large-scale energy storage technology in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 3-8.
- [12] 黄策, 燕云飞, 沈迎, 等. 超容储能辅助火电机组调频的电气问题研究[J]. 电气技术, 2022, 23(8): 103-108.
HUANG Ce, YAN Yunfei, SHEN Ying, et al. Research on electrical problems of frequency modulation of thermal power unit assisted by supercapacitor energy storage[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(8): 103-108.
- [13] 李建林, 李雅欣, 周喜超. 电网侧储能技术研究综述[J]. 电力建设, 2020, 41(6): 77-84.
LI Jianlin, LI Yaxin, ZHOU Xichao. Summary of research on grid-side energy storage technology[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(6): 77-84.
- [14] 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.
WANG Wei, CHEN Gang, CHANG Dongfeng, et al. Super capacitor aided fast frequency modulation technology of coal-fired unit[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 111-116.
- [15] 涂伟超, 李文艳, 张强, 等. 飞轮储能在电力系统的工程应用[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 869-877.
TU Weichao, LI Wenyan, ZHANG Qiang, et al. Engineering application of flywheel energy storage in power system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 869-877.
- [16] ZHU Z Y, ZHU J, ZHU H L, et al. A novel axial split phase bearingless switched reluctance machine for on-board flywheel battery[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(4): 3175-3186.
- [17] 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, 2020: 1.
HUANG Dengchao. Research on flywheel energy storage auxiliary frequency modulation of 300 MW heating unit[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020: 1.
- [18] 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): 2597-2606.
SUI Yunren, LIANG Shuangyin, HUANG Dengchao, 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): 2597-2606.
- [19] 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.
HE Linxuan, LI Wenyan. 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.
- [20] 唐西胜, 刘文军, 周龙, 等. 飞轮阵列储能系统的研究[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(3): 208-221.
TANG Xisheng, LIU Wenjun, ZHOU Long, et al. Flywheel array energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(3): 208-221.
- [21] KOSHIZUKA N. R&D of superconducting bearing technologies for flywheel energy storage systems[J]. Physica C: Superconductivity & Its Applications, 2006, 445-448:1103-1108.
- [22] ZHANG J C, HUANG L P, CHEN Z Y. Research on flywheel energy storage system and its controlling technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 108-111.
- [23] 刘海山, 徐宪龙, 魏书洲, 等. 基于提升华北电网考核指标的飞轮储能参与调频划分电量控制策略[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(4): 1176-1184.
LIU Haishan, XU Xianlong, WEI Shuzhou, et al. Flywheel energy storage participates in frequency modulation power division control based on improving power grid assessment index of north China power grid[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(4): 1176-1184.
- [24] 国家能源局西北监管局. 关于印发《西北区域发电厂并网运行管理实施细则》及《西北区域并网发电厂辅助服务管理实施细则》的通知: 西北监能市场(2018)66号[EB/OL]. (2018-12-15) [2023-07-12]. <http://xbj.nea.gov.cn/website/Aastatic/news/196276.html>.
Northwest China Energy Regulatory Bureau of National Energy Administration of the People's Republic of China. Notice on printing and distributing the *Implementation Rules for the Management of Grid-connected Power Plants in the Northwest Region* and the *Implementation Rules for the Management of Auxiliary Services of Grid-connected Power Plants in the Northwest Region*: XBJNSC (2018) No.66 [EB/OL]. (2018-12-15) [2023-07-12]. <http://xbj.nea.gov.cn/website/Aastatic/news-196276.html>.
- [25] PHADKE A G, BI T S. Phasor measurement units, WAMS, and their applications in protection and control of power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(4): 619-629.

(责任编辑 邓玲惠)