

基于动态规划的双馈风机联合储能系统削峰填谷优化方法

文/苗鹏军 田小江 库宏刚 张万鹏 李周波
中油国家石油天然气管材工程技术研究中心有限公司新能源技术研究所

为提升海上风机储能系统功率调度比，营造更加稳定、安全的削峰填谷环境，对基于动态规划的双馈风机联合储能系统削峰填谷优化方法进行设计分析。最终的测试结果表明调度效果明显得到了优化，具有实际的应用价值。

双馈风机联合储能主要是依靠电能转换，再加上储能单元的更改、调整，逐步改变发电侧变换器中的实际容量，以此来扩展储能单元平抑功率的波动，提升整体的储备能力。双馈风机联合储能系统的诞生是储能工作智能化的一种表现。在系统的辅助执行之下，可以从多个方向调整系统的执行程序，采用多协议转换的方式，实现相应的储能任务。

已有学者针对这一领域展开了深入的研究，如蒋迎花等人提出一种多负荷系统削峰填谷优化方法，以系统负荷标准差最小为优化目标，将用户的负荷波动最小化。该方法具有较好的经济性，能够有效降低系统的总费用，但是其功率调度效率较低，难以保证系统运行过程中削峰填谷环境的稳定性。邵振等人提出一种基于改进多粒子系统削峰填谷的优化方法，设置一个外部档案储存非支配的帕累托（Pareto）最优解，获得最优前沿面，再采用模糊隶属度法求解折中最优解。该方法具备了一定的实用性能，但是在系统运行过程中，削峰填谷的环境并不安全，存在一定的运行风险，且功率调度比仍不理想。

随着储能难度的增加，数据、信息的扩展，传统的系统已经逐渐难以满足需求，为解决现存问

题，本文对基于动态规划的双馈风机联合储能系统削峰填谷优化方法进行设计与分析。

优化方法设计

1. 动态储能特征提取

在对动态规划下双馈风机联合储能系统削峰填谷优化方法设计之前，需要先针对海上风机的运行状态以及削峰填谷需求、标准，提取风机的动态储能特征。通常情况下，海上风机储能一般采用化学反应方式，实现化学能与电能之间的循环转换，最终实现能耗储备。构建电池储能系统（BESS）结构，储能装置上安装蓄电池组、能量转换设备以及逆变器，利用变压器将电流分散为几个阶段，关联装置对电流的大小进行实时控制，具体结构如图1所示。

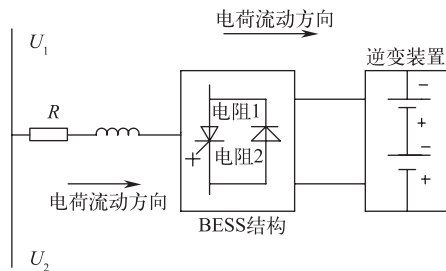


图1 动态储能结构

基金项目：中国石油天然气集团有限公司技术攻关项目《近海风能资源利用关键技术及装备开发与示范应用》（2022DJ5480）

根据图1可以完成对动态储能结构的设计与分析。随后,依据风机中电荷的流动方向设定目标电阻,并计算出等效电感比,一般设定为1.25~3.05,利用BESS换流站获取每一个系统运行周期节点的电荷、直流侧电容的变化范围,提取运动规律特征。当BESS启动时,外部的承接装置将会与电力系统关联,逐渐形成一个逆变程序,汇总整合所提取的电荷规律及特征,为后续优化工作奠定基础。

2. 储能调度削峰填谷结构设计

在完成对动态储能特征提取后,需要结合实际的储能需求,构建多目标的调度削峰填谷结构。首先,需要根据获取的调度特征计算出目标函数。海上双馈风机的负荷削峰填谷一般并不是固定的,当负荷处于尖峰状态时,负荷低谷增大,峰谷差随之增加。

为了避免上述情况的出现,可以尽量减少风机频繁起停或者延缓备用机组的投入,设定固化的峰值标准,调整风机为最佳状态,利用系统更改风机的实际覆盖作用范围,在合理、平稳的环境下,计算海上双馈风机系统运行的极限负荷,即

$$\min f(t) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (k^3 - \beta t)} \quad (1)$$

式中, $\min f(t)$ 为极限负荷标准差; k 为电荷运动距离; β 为动态放电功率; i 为充放电功率。

通过上述计算,最终得出实际的极限负荷标准差。根据得出的数值,设定对应的标准,并将其作为目标函数。此时计算得出的极限负荷标准差相当于系统削峰填谷的平均值,根据数值的变化,利用系统调整风机的执行响应区域,实现基础优化。

3. 构建储能系统动态规划阶梯优化模型

在完成对储能调度削峰填谷结构设计之后,根据系统的运行状态,构建储能系统动态规划阶梯优化模型。与传统削峰填谷模型不同的是,阶梯式模型的覆盖作用范围相对更为广泛,并且对于风机的控制效果更佳。测定此时的目标函数,并结合动态规划处理,对相应指标参数的变动情况进行分析,具体见表1。

表1 指标参数变动

测定指标	预设标准	实测标注	变动比
目标函数	12.03	16.19	1.25
负荷均值	6.3	8.2	1.12
对峰谷差	2.7	1.6	0.74

根据表1,对指标参数变动进行分析。在标定的范围之内,构建阶梯式模型结构,并利用动态规划模式,采用动态规划处理方式,设定优化模型的约束条件。这部分主要是针对海上风机的运行状态,测定在充电和放电两种情况下系统削峰填谷优化效果,设定荷电状态最小值为1.036,最大值为11.261,荷电的单元变动比为0.65。利用专业设备,测定出此时海上双馈风机系统的绝对峰谷差为

$$\Delta h = h_{\max} - h_{\min} \quad (2)$$

式中, Δh 为绝对峰谷差; $h_{\max}$ 为最大峰值; $h_{\min}$ 为最小峰值。

通过上述计算,最终得出实际的绝对峰谷差。随后,在初始的优化模型中,设定削峰填谷的荷电状态,依据动态规划处理需求,获取阶梯功率阈值,并分析其变化状态的情况,具体如图2所示。

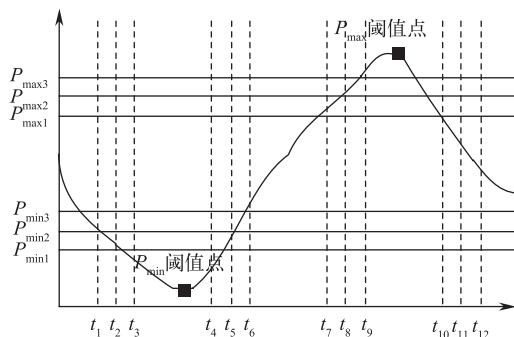


图2 阶梯功率阈值变化状态

根据图2完成对阶梯功率阈值变化状态的分析与研究。双馈风机功率阈值的变化会逐步增加峰谷差率,并形成模型中储能的传输波动,结合动态规划处理,计算出负荷峰谷波动标准差,形成阶梯式的优化结构,并确定具体的削峰填谷范围,完成对储能系统动态规划阶梯优化模型的建立。

4. 削峰填谷二次寻优处理

在完成对储能系统动态规划阶梯优化模型的构建之后,根据动态规划需求及标准,针对海上双馈风机系统的削峰填谷处理进行二次寻优。在系统中布设一定数量的寻优节点,与优化模型相关联,设定收敛粒子,根据动态规划模式,设定迭代寻优程序,并对基础性的数据信息进行采集汇总。根据粒子的变化规律,提取出削峰填谷的特征规律,并计算出收敛标准值为

$$U=\frac{\int v^2\mathfrak{J}_1+\mathfrak{J}_2}{N(0.5y-1)}\tag{3}$$

式中， U 为收敛标准值； N 为惯性权重； y 为线性递减距离； v 为后期优化差值； $\mathfrak{J}_1$ 为局部储能值； $\mathfrak{J}_2$ 为综合储能值。

通过上述计算，最终可以得出实际的收敛标准值，设定二次寻优的削峰填谷优化标准，形成前沿二次优化储能机制，完成对削峰填谷二次寻优的处理。

5. MOP折中判定实现系统削峰填谷优化

在完成对削峰填谷二次寻优处理之后，采用MOP折中判定最终实现系统削峰填谷优化。首先，根据动态规划模式，再加上双馈风机的运行数据、信息，构建一个Pareto优化解集，根据支配关系淘汰掉被支配的解，进而形成精英策略的非支配Pareto解集，最终形成动态的优化矩阵，标定出MOP折中判定标准。

需要注意的是，预设的约束条件此时已经无法满足需求，可以采用模型，获取实时数据，并测定峰值与低谷储能状态，调整阈值，利用折中判定的方式，循环叠加。同时，对系统的执行程序进行调整，更改叠加的指标参数，设定充放电的响应时间，通过阶梯式的削峰填谷优化模式，扩大实际的处理范围，最终实现系统削峰填谷优化。

方法测试

本次主要是对动态规划下双馈风机联合储能系统削峰填谷优化方法的实际应用效果进行分析与研究。考虑到最终测试结果的可靠性、精准性，选择海上双馈风机系统作为测试的主要目标对象，设定传统多粒子系统削峰填谷优化测试组、传统多负荷系统削峰填谷优化测试组以及本文所设计的动态规划削峰填谷优化测试组，并将三个测试组最终得出的结果作对比分析。

1. 测试准备

在对动态规划下双馈风机联合储能系统削峰填谷优化方法的实际应用效果进行分析与研究之前，需要先搭建相应的测试环境。首先针对海上双馈风机系统的应用现状与情况，获取基础数据。采集到的数据表明，风机电池容量保持率均为100%，各电池的操作维护误差在1%以下。

复杂环境下，双馈风机荷电的运行上下限为92%和15%。测定之前，可以先将风机系统的控制区域划分为40个，并设定对应的削峰填谷周期，一般7天为一周期，以此来确保测试结果的稳定性和可靠性。风机的电池储能系统更换电池的时间为3年，经过系统测定，风机的直流与交流循环转换效率为93%。设定风机储能指标参数，具体见表2。

表2 风机储能指标参数

测定指标	转换前标准	转换后标准
功率调度差值	1.02	0.67
转移比	1.36	1.14
弃电率（%）	12	9

根据表2完成对风机储能指标参数的设定。随后根据上述数据，调整反馈风机的储能参数值，营造多目标的削峰填谷环境。核定测试的设备及装置是否处于稳定的运行状态，并确保不存在影响最终测试结果的外部因素，核定无误后，开始测试。

2. 测试过程及结果分析

根据上述搭建的测试环境，结合动态规划处理方式，对双馈风机联合储能系统削峰填谷优化方法的实际应用效果进行测定。获取海上双馈风机系统的基础数值，测算出负荷标准差，选定最小目标进行单向优化，改造原光-储供电系统，构建多目标的调度处理，经过优化后的双馈风机的运行速率比通常控制在1.25~2.65，同时，优化风机储能系统的容量配置和功率调度结构。根据风机的运行情况，计算出系统的弃电率为

$$T=\mu-\sum_{e=1}\sqrt{0.2v+e^2}\tag{4}$$

式中， T 为系统的弃电率； μ 为风机传递速率； v 为削峰填谷差值； e 为充放电效率。

通过上述计算，得出实际的系统弃电率。随后，测定出风机中不同系统管控区域的弃电率，结合动态规划处理方法，设定一定数量的削峰填谷节点，定期采集相应的处理数据，根据系统的储能效果进行对比分析，并测算出实际的电池储能系统的功率调度效率，如图3所示。

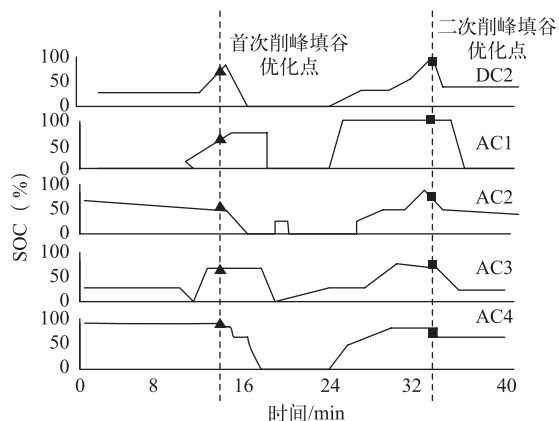


图3 电池储能系统的功率调度值变动状态图示

根据图3完成对测试结果的分析与研究，具体的测试结果见表3。

表3 测试结果对比分析

测试目标	传统多粒子系统削峰填谷优化测试组	传统多负荷系统削峰填谷优化测试组	动态规划削峰填谷优化测试组
负荷标准差	2.01	3.55	1.10
弃电率 (%)	6.54	5.19	2.01
储能系统功率调度效率 (%)	81.3	81.9	92.19

根据表3完成对测试结果的分析与研究。对比于传统多粒子系统削峰填谷优化测试组、传统多负荷系统削峰填谷优化测试组，本文所设计的动态规划削峰填谷优化测试组最终得出的储能系统功率调度效率可达到92.19%，表明调度效果得到了优化。

结束语

综上所述，对基于动态规划的双馈风机联合储能系统削峰填谷优化方法进行设计与分析。考虑到最终测试结果的稳定性与可靠性，本文会选择较为真实的测试背景，结合动态规划方法，根据系统的应用需求、标准，设计更加灵活、多变的优化模式。以多个优化目标作为处理指引，调整系统削峰填谷的覆盖范围，同时设计可预测的负荷数据程

序，对比于传统程序，能够快速、精准计算出充放电阈值，进而掌握电荷状态，具有一定的实时控制性，为日常系统的应用和调整提供参考依据。EA

参考文献

- [1] 石南辉，颜世周，张科研，等．基于欧洲标准的风电塔筒用S355NL钢焊接工艺评定[J]．焊管，2018，41(9)：21-24．
- [2] 尹璐，杨卫红，刘艳茹，等．考虑储能系统不同运营方式对区域负荷特性影响的分析方法[J]．供用电，2021，38(7)：79-86．
- [3] 黄培庭，赵维裕，黄鹏程．高速公路隧道储能电站的优化控制与经济性分析[J]．福建交通科技，2021(6)：117-121．
- [4] 蒋迎花，侯少攀，刘永忠．多电池储能系统实现削峰填谷的分步优化方法[J]．高校化学工程学报，2020，34(5)：1265-1273．
- [5] 邵振，邹晓松，袁旭峰，等．基于改进多目标粒子群优化算法的配电网削峰填谷优化[J]．科学技术与工程，2020，20(10)：3984-3989．
- [6] 盛锦壮，谢陈磊，李善寿．基于新型建筑智能化平台的多储能装置协同控制方法研究[J]．安徽建筑大学学报，2020，28(3)：32-37．
- [7] 王一飞，董新伟，杨飞，等．基于配电网电压质量的分布式储能系统优化配置研究[J]．热力发电，2020，49(8)：126-133．
- [8] 陈轶玮，钱啸，汤易，等．两部制电价引导下储能系统优化运行方法[J]．中国电力，2021，54(2)：98-103，112．
- [9] 薛澳宇，马速良，马可欣，等．规模化新能源-储能技术控制策略及商业模式研究[J]．电气应用，2022，41(8)：52-60．
- [10] 高利，万君．基于SOC的储能削峰填谷控制策略[J]．电气应用，2022，41(7)：91-97．

