

DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2308206

# 面向新能源的全钒液流电池储能电站优化设计

苗建军

(上海电气灵储科技有限公司, 上海市 静安区 200070)

**摘要:** 作为一种新型长时储能技术, 全钒液流电池 (vanadium redox flow battery, VRFB) 适用于大规模调峰调频、新能源配套等场景, 但存在功率与容量配比复杂、占地较大、能效较低的问题。立足于解决新能源发电弃风弃光限电问题, 通过建立数学模型, 优化目标函数, 提出储能容量配置优化设计的理论方法; 通过优化储能电站 (energy storage station, ESS) 拓扑设计, 提高系统集成度和电力接入的可靠性; 通过建立能量回收数学模型, 提出能量回收型热管理设计提高系统效率的方法; 通过建立多源数据融合数字孪生模型, 提出基于数字孪生的 VRFB 储能运维技术的思路。最后, 通过仿真分析, 验证了优化设计的可行性, 其削峰率达 16%, 限电量由原来的 45% 下降到 14%, 同时节省占地 15%, 效率从 70% 提升至 90% 左右, 为面向新能源的大规模 ESS 的优化设计提供了系统的理论方法和可行的解决方案。

**关键词:** 新能源; 全钒液流电池 (VRFB); 储能电站 (ESS); 优化设计

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

## Optimal Design of Vanadium Redox Flow Battery Energy Storage Station for New Energy

MIAO Jianjun

(Shanghai Electric Energy Storage Technology Co., Ltd., Jing'an District, Shanghai 200070, China)

**ABSTRACT:** As one of new long-term energy storage technology, the vanadium redox flow battery (VRFB) is suitable for peak-shaving, frequency modulation and new energy support, etc. However, there are issues such as complex power to capacity ratio, larger occupied area, and lower energy efficiency. Based on solving the problem of abandoning of wind, solar, and power limit in new energy power generation, this paper forwards a theoretical method for the optimal design of energy storage capacity configuration by establishing a mathematical model and optimizing the objective function. By optimizing the topology design of energy storage station (ESS), system integration and reliability of power access are improved. By establishing an energy recovery mathematical model, a method for improving system efficiency through energy recovery based thermal management design is proposed. By establishing a multi-source data mix digital twinning model, the idea of VRFB energy storage operation and maintenance technology based on digital twinning is proposed. Finally, the simulation analysis verifies the feasibility of the optimized design. The peak shaving rate can be reached to 16%, and the power limit is reduced from 45% to 14%. Meanwhile, the occupied area can be saved by 15%, and the efficiency can be increased from 70% to about 90%. It provides a systematic theoretical method and feasible solution for the large-scale VRFB ESS optimization design for new energy.

**KEY WORDS:** new energy; vanadium redox flow battery (VRFB); energy storage station (ESS); optimal design

## 0 引言

双碳背景下构建新型电力系统, 需要新能源实现大规模、高比例、高质量、市场化的应用与发展。

风光储联合发电系统可有效增大风光资源接入电网的容量, 减少旋转备用, 提高供电的可靠性和电能质量, 降低系统发电成本<sup>[1-6]</sup>。

面向新能源发电侧的大规模储能装备, 由于系统输出功率和储能容量都比较大, 如果发生安全事故, 造成的危害和损失会更大。因此, 对大规模储能设备的要求, 一是安全性, 二是生命周期的性价

基金项目: 国家自然科学基金项目(71871160)

Project supported by National Natural Science Foundation of China (71871160)

比,三是生命周期的环境负荷<sup>[7]</sup>。全钒液流电池(vanadium redox flow battery, VRFB)是于20世纪80年代由澳大利亚新南威尔士大学的SKYLLAS-KAZACOS教授及其团队提出的<sup>[8]</sup>,作为一种电化学系统,钒电池把能量储存在含有不同价态钒离子氧化还原电对的电解液中。具有不同氧化还原电对的电解液分别构成电池的正、负电解液,正、负极电解液中间由离子交换膜隔开。通过外接泵把溶液从储液槽压入电池堆体内完成电化学反应,反应后溶液回到储液槽,活性物质不断循环流动,由此完成充放电<sup>[9]</sup>。与其他化学储能电池相比较,VRFB最大的特点是电池活性物质不存在于电池内部,而是储存在电池外部的罐体中,其输出功率和储能容量可独立设计,可实现长时储能,理论上最长可达25~50 h<sup>[10]</sup>,因而更适用于大规模储能。正是由于在环保、安全、成本、效率、一致性等方面具有的突出优点,全钒液流储能电池正成为当前国内外用于可再生能源发电的大规模储能技术的首选之一<sup>[11-12]</sup>。

近年来,我国储能装机容量迅速增长,以钒电池为代表的液流电池正处于快速发展期。大连融科储能公司于2012年在辽宁省龙源卧牛石风电场建设了5 MW/10 MW·h的VRFB储能应用示范电站,而正在实施的200 MW/800 MW·h液流储能调峰电站项目是目前全球最大规模的VRFB储能电站(energy storage station, ESS)<sup>[13]</sup>。上海电气近3年先后建成了国家电投青海1 MW/5 MW·h VRFB储能、广东汕头智慧能源1 MW/1 MW·h VRFB储能系统、安徽海立工业园1 MW/4 MW·h VRFB储能等项目,目前多个10、100 MW级VRFB储能项目也在规划实施当中。从目前的运行情况看,VRFB的一致性较好,响应速度快,运行稳定,具备大规模应用的技术条件,但占地面积较大,系统能效较低(约70%~75%)。

作为一种新型的大规模储能技术,目前尚未形成针对VRFB ESS整体优化设计的理论和研究成果。本文从解决某新能源风电场弃风限电问题入手,通过建立数学模型,优化目标函数,提出全钒液流ESS优化设计的一套理论方法,并从容量配置、系统集成、热管理与能量回收提高效率、智能运维等方面提出ESS优化设计的整体思路,将为解决大规模新能源发电问题提供现实的解决方案。

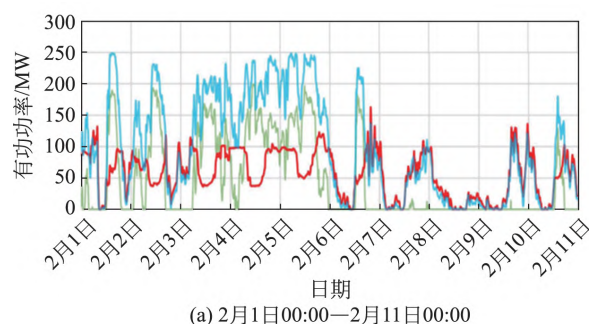
## 1 新能源风电场运行分析

### 1.1 限电情况分析

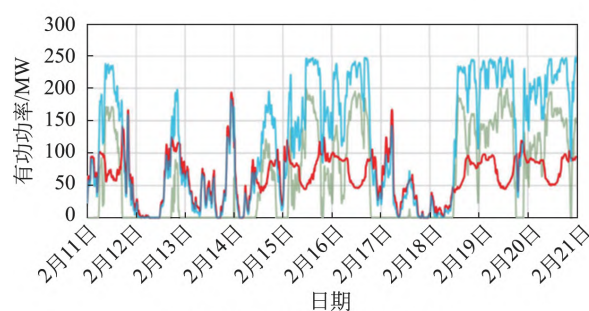
风电场A装机容量为250 MW,该风电场2021年2月实际发电量3 584.89万kW·h,因限电损失电量1 329.52万kW·h。根据机组历史运行数据分析,风电场A在2021年2月理论应发电量为6 478.12万kW·h,排除设备停运损失电量13.29万kW·h,限电损失电量总计2 879.94万kW·h。2月风电场A有效风时数486.3 h,全月限电约267 h,限电时段占有效风时数的54.8%。根据对风电场理论有功功率的测算,结合现场提供的限电记录综合分析,风电场A在2月份全月限电情况较为严重,体现在以下3个维度:

#### (1) 限电时间长。

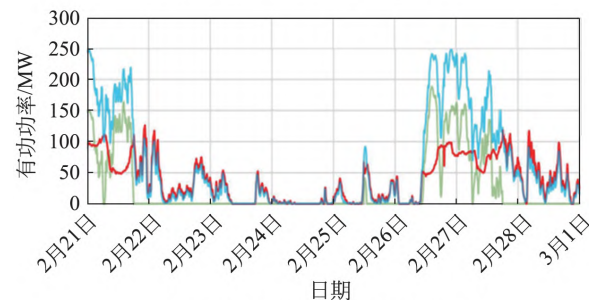
全月限电时长趋势分析如图1所示。全月限电



(a) 2月1日00:00—2月11日00:00



(b) 2月11日00:00—2月21日00:00



(c) 2月21日00:00—3月1日00:00

—有功余量; —实发有功; —理论有功。

图1 全月限电时长趋势分析

Fig.1 Trend analysis of monthly power limitation duration

约 267 h, 大风时段普遍存在限电, 2 月 1—6 日、14—16 日、18—21 日、26—28 日最为突出, 存在连续跨天限电情况。

### (2) 限电幅度大。

有功余量总体分布如图 2 所示, 可见: 限电期间的有功余量(受限有功)平均 7.05 万 kW, 部分时段近 20 万 kW, 2 万 kW 以上的时段约 257 h, 占全部限电时段的 96%。

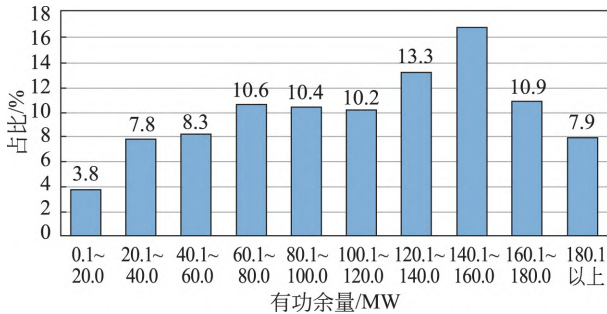


图 2 有功余量总体分布图

Fig.2 General distribution of active power margin

### 1.2 限电时长分析

对该风电场 2 月份限电时段的统计如图 3 所示, 可见: 单次限电时长 6 h 以下的情况占比较高。

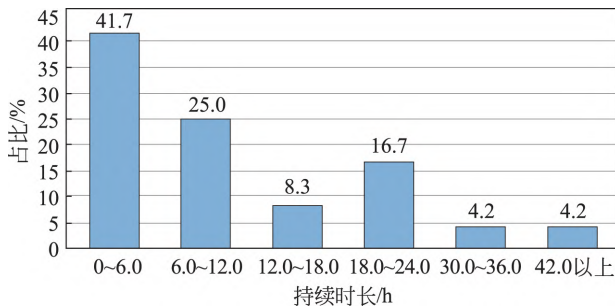


图 3 风电场 2 月份限电时长分布图

Fig.3 Time distribution of power rationing of wind power station in Feb.

## 2 VRFB ESS 的优化设计

### 2.1 面向新能源的 ESS 优化设计流程

面向新能源的储能配置与新能源站场的设计、运行方式具有强相关性, 针对不同功能需求, 储能的选择和配置也不一样。采用系统调频、削峰填谷模式时, 储能系统应根据电网要求, 经过优化分析后确定<sup>[14]</sup>。这种场景主要根据削峰填谷的时长, 通过储能确保收益的最大化, 因而这类储能适宜采用能量型储能, 容量充裕率更高, 适合长时间充放电, 单位能量成本更低, 液流电池则非常适合于这一场景。面向新能源的 VRFB ESS 优化设计流程如图 4 所示。

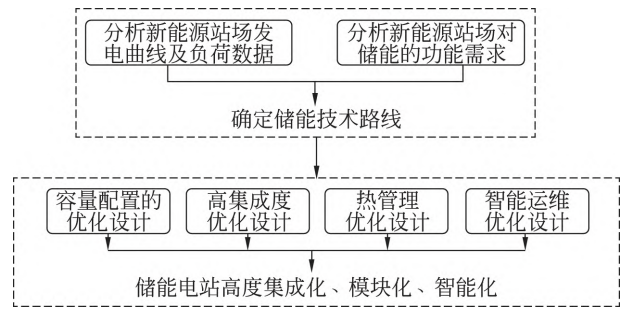


图 4 ESS 优化设计的流程图

Fig.4 Flow chart of optimal design of energy storage power station

### 2.2 ESS 容量配置的最优化设计

风电场 A 的储能配置是基于解决限电弃风的问题, 实现风电消纳的最大化。储能容量配置的最优化是在给定的约束条件下, 建立发电收益随储能额定功率和最大储能容量变化的函数, 优化配置的目标是求解目标函数中发电收益的最大值。为此需要建立数学模型, 计算最大化运行收益, 获得成本和效益的最优配置。

#### (1) 目标函数。

$$F = \sum_{i=1}^{365} [(\lambda Q_{P_{\max}, E_{\max}} - C_{P_{\max}, E_{\max}}) \Delta T] \quad (1)$$

式中:  $F$  为全年储能消纳弃风电量的最大收益;  $\lambda$  为风电上网电价;  $Q_{P_{\max}, E_{\max}}$  及  $C_{P_{\max}, E_{\max}}$  分别为在风电场最大允许上网功率限值  $P_{\max}$  及储能最大配置容量  $E_{\max}$  条件下储能在某日消纳的弃风电量以及储能运行成本;  $\Delta T$  为某日弃风时长。

#### (2) 约束条件。

电网的购电约束为

$$0 \leq P_{\text{grid}}(t) \leq P_{\text{grid}, \max}(t) \quad (2)$$

储能设备的功率约束为

$$0 \leq P(t) \leq P_{\max}(t) \quad (3)$$

储能设备的容量约束为

$$E_{\min} \leq E(t) \leq E_{\max}(t) \quad (4)$$

风电机组出力上下限约束为

$$0 \leq P_w(t) \leq P_{w, \max}(t) \quad (5)$$

#### (3) 初始度电成本。

$$L_{\cos} = \frac{XP(t) + YP(t)H + ZP(t)}{P(t)H} = \frac{X + Z}{P(t)H} + Y = \frac{X}{H} + Y + \frac{Z}{H} \quad (6)$$

式中:  $L_{\cos}$  为初始度电成本;  $X$  为液流电池成本;  $Y$  为电解液成本;  $Z$  为其他成本;  $H$  为时长。

储能电池功率与储能容量配置呈线性相关, 在本项目中将储能时长分别按 1、2、3、4、5 h 进行配

置。根据计算,当储能容量取 5 h 时,可获得最优的度电成本,如表 1 所示。

表 1 储能系统配置与度电成本分析  
Table 1 Energy storage system configuration and electricity cost analysis

储能时长/h	系统功率/MW	系统容量/ (MW·h)	度电成本/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]
1	5.00	5	0.70
2	2.50	5	0.43
3	1.67	5	0.34
4	1.25	5	0.30
5	1.00	5	0.27

由表 1 所示 VRFB 储能时长与度电成本的关系,可建立 VRFB 储能时长与度电成本估算模型,其变化曲线如图 5 所示。

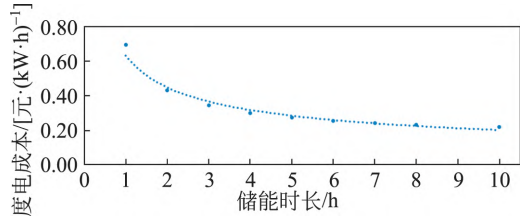


图 5 VRFB 储能时长与度电成本估算曲线  
Fig.5 Estimation curve of energy storage duration and electricity cost of VRFB

根据上述储能优化配置目标函数的计算结果,结合风电场 A 风资源及用电负荷不平衡的现状,及 VRFB 储能度电成本随储能时长变化趋势估算模

型,ESS 的功率配置为 20 MW;根据风电场全月限电时数 267 h,则每日平均限电时数为 10 h(即 267/28),考虑到单次限电时长 6 h 以下的情况比例最高,及占地面积、技术经济性等因素,因此本项目额定功率下持续充放电时间配置为 5 h,ESS 配置规模定为 20 MW/100 MW·h。

2.3 ESS 系统集成的优化设计

储能电池在高电压状态下的一致性和均衡性是衡量电池性能的重要指标,应尽量选择大容量储能双向变流器(power conversion system, PCS),比较 0.25、0.5、1 MW 储能 PCS 性能发现,采用 1 MW 储能 PCS 效率更高、电能损耗更小,因而更具优势。

在电力接入方面,储能接入新能源风电场有集中式和分散式 2 种方式。20 MW/100 MW·h ESS 规模较大,适宜采用集中式并网接入的方式,储能设备集中布置,ESS 需配置升压变压器,通过 35 kV 汇流后统一接入电网系统。这种接入方式可整体上减少分散式接入对风机出力的波动,实现综合调控风储联合电站出力的目的。

为提高系统集成度,将升压逆变合二为一,每 4 MW PCS 逆变升压单元包括 4 台 1 MW 储能 PCS,每 4 台 PCS 接入 1 台升压变压器。全站配置 5 套 4 MW 储能 PCS 逆变升压一体化汇流单元。图 6 为 4 MW 储能 PCS 逆变升压单元拓扑图。

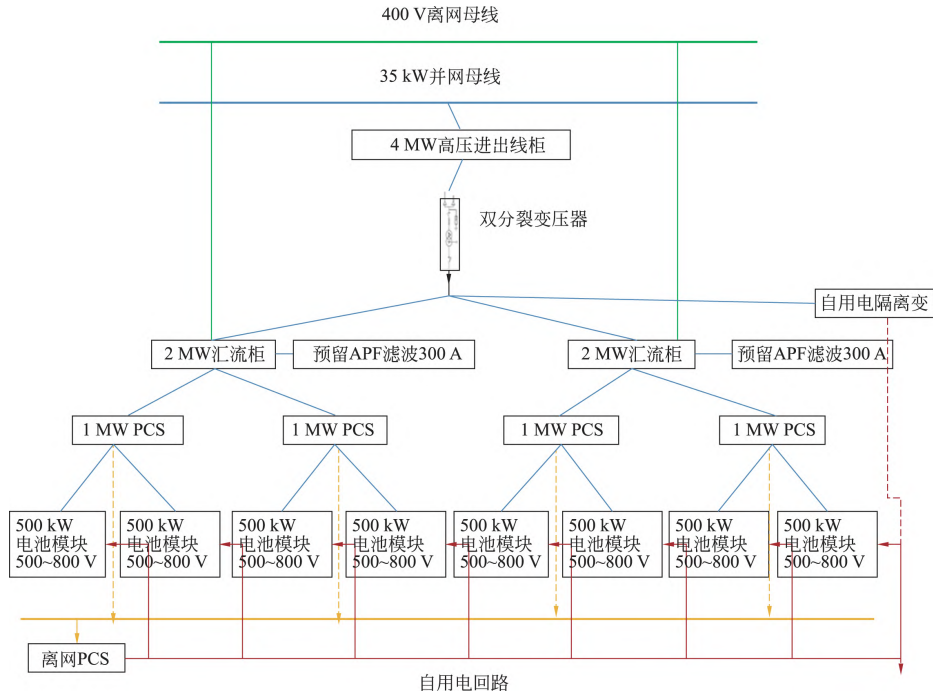


图 6 4 MW PCS 逆变升压单元拓扑图  
Fig.6 Topology of 4 MW PCS inverter boost unit



## 2.4 ESS 的能量回收热管理的优化设计

### 2.4.1 ESS 的能量回收热管理的基本原理

VRFB 具有安全、环保、配置灵活等特点,但电池在充放电转换过程中,电能会有一定程度的损失,ESS 在运行过程中电池充放电和储能 PCS 散热会有约 15%~20% 的能量损耗,主要以热能的形式散失。这部分能量损失会提高电解液的温度,如不及时冷却,不仅会降低电池充放电效率,而且会导致电解液结晶,严重时损坏电堆。

针对这一特性,通过在 ESS 集中配置带能量回收的热管理系统,吸收 VRFB 储能系统的散热,为储能系统提供冷却所需要的冷媒水的同时,还可为用户端输出生活热水、采暖热水或工艺热水,提高电站的总体效率,使 ESS 的综合效率由 70%~75% 提高至 90% 左右,实现了 ESS 电、热联产联储,从而获得可观的节能经济效益和环保生态效益。图 7 为通过采用能量回收后的 VRFB ESS 的能流平衡图。

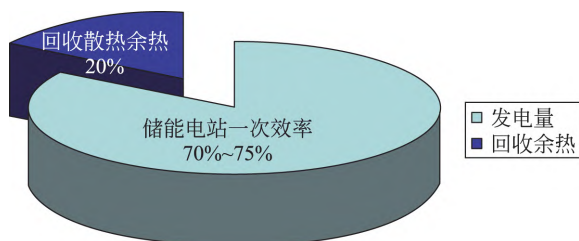


图 7 VRFB ESS 的能流平衡图

Fig.7 Energy flow balance diagram of VRFB ESS

### 2.4.2 VRFB 的散热特性分析

VRFB 在运行过程中,约有 10%~20% 的能量以热量的形式传递给电解液,如果忽略电解液系统与外界的传热,不同储能时长的钒电池储能系统持续充放电的电解液温升曲线如图 8 所示。

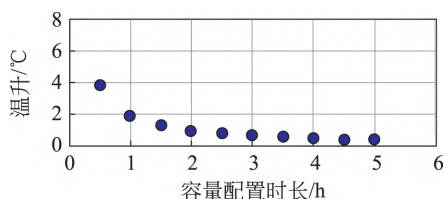


图 8 VRFB 温升曲线图

Fig.8 Temperature rise curve of VRFB

根据 VRFB 的温升特性曲线,按照每天 1~1.5 个循环,每天运行约 10~15 h,则完成一次充放电循环系统温升约 3℃。电解液最佳工作温度区间为 20~35℃,温度太低则内阻太大,温度太高则电解质分解,容量损失、热失控的可能性增大,当电解液工作温度  $\geq 35^\circ\text{C}$  时,需要开始排热冷却。

### 2.4.3 ESS 能量回收数学模型的建立

根据热泵原理进行能量回收,得到 ESS 能量回收的热平衡方程,即 VRFB 传热—散热模型:

$$Q_n = Q_0 + W_{hp} = VC_w \rho_w (T_2 - T_1) \quad (7)$$

式中:  $Q_n$  为热泵提供给用户的有用热能, kW;  $Q_0$  为热泵从低温热源中吸取的余热, kW;  $W_{hp}$  为热泵工作时消耗的电能, kW;  $V$  为电解液的体积,  $\text{m}^3$ ;  $C_w$  为电解液的比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\rho_w$  为电解液的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $T_1$  为电解液运行控制温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_2$  为电解液放电后的温度,  $^\circ\text{C}$ 。

由热泵的概念得到热泵的性能系数  $C_{OP}^{[15]}$ :

$$C_{OP} = 1 + \frac{Q_0}{W_{hp}} \quad (8)$$

此项目中,电解液密度为  $1363 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,电解液总体积为  $6579 \text{ m}^3$ ,电解液的比热容为  $3.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ,电池满充放一次温升  $\Delta T = T_2 - T_1 = 3.1^\circ\text{C}$ 。将上述数据代入式(7),得到 20 MW/100 MW·h 储能系统单次循环总散热量为 90 GJ,按全年运行计算,则 ESS 运行 1 年的总散热量达 32 850 GJ,余热资源十分可观,具有非常高的利用价值和潜力。

衡量 ESS 最重要的综合效率指标,可采用下式进行计算:

$$\eta = (Q_1 + Q_2)/Q_3 \quad (9)$$

式中:  $\eta$  为 ESS 的综合效率;  $Q_1$  为充放 1 个循环的放电量,  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $Q_2$  为充放 1 个循环的供热量,  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $Q_3$  为充放 1 个循环的充电量,  $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

能量回收型水源热泵制冷性能系数为 4,供热性能系数为 5,对于储能系统的基本单元模块,即 250 kW/1 250 kW·h 储能模块来说,热泵输出热量为 45 kW,1 次充放电循环回收热量理论值为 405 kW,热量损失按 20% 计算,则净回收热量,即供热量为 324 kW·h,充电量为 1 673 kW·h,放电量为 1 162 kW·h。将以上数据代入式(9)可得:储电净效率在 70% 的情况下,采用能量回收热管理技术则 ESS 的综合效率可提升至 89% 以上,实现了电热联储联供,具有显著的经济效益。

## 2.5 ESS 智能运维的优化设计

### 2.5.1 液流电池储能运维的痛点

面向新能源的 VRFB ESS 设备数量多、自然环境复杂、监测难度大。监测内容除了荷电状态/健康状态(SOC/SOH)外,还包括电堆电压、电流、电解液的流量、液位、压力、温度及漏液监测等。对于大规模储能,传统方式收集的信息较为零散,难以

掌握全部电池系统的健康状态,增加了运维负担。

### 2.5.2 基于数字孪生的储能运维技术原理

数字孪生是一种实现运行中的真实设备与系统向虚拟化模型映射的技术,它充分利用真实设备运行模型、实时传感器数据、运行历史等数据,从不同方面实现真实世界到虚拟空间的模拟<sup>[16]</sup>,从而实现真实设备整个运行状态的全过程数字化。

利用数字孪生技术构建 VRFB 储能系统可视化数字运维技术,关键在于将各类传感技术在现实的 VRFB 储能系统中采集的电流、电压及循环系统的温度、流量、液位、压力、漏液检测等安全运行指标数据仿真重现在 3 维数字孪生世界中。VRFB ESS 的数字孪生原理如图 9 所示。

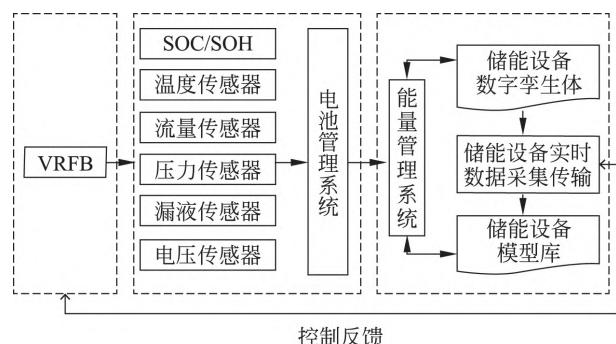


图 9 VRFB ESS 数字孪生的原理

Fig.9 Principle of digital twin for VRFB ESS

VRFB 储能系统作为一个包含大量元件、运行过程多样的复杂系统,必然也是一个海量数据来源<sup>[17]</sup>。依托大数据和人工智能技术,数字孪生平台能对各类数据进行处理判断,分析当前系统 SOC/SOH 运行状态,进行安全预警和运行监测,最终实

现储能系统直观清晰的感知、完整的数据集成、实景化等功能的全方位、可视化地展示和控制,有效提升运维管理人员对 VRFB 储能系统的监控管理效率,提高储能系统的经济、安全、可靠运行,支撑储能系统更好地服务于使用场景。

### 2.5.3 VRFB 数字孪生智能运维系统的构建

针对 VRFB 储能系统的安全预警和电池健康管理需求,从数字孪生的角度出发,构建 3 维虚拟孪生模型,形成 3 维实景模型及物理场孪生模型的映射关系。通过数字孪生模拟现实中的突发危险情况,捕获不同风险因素、操作场景和系统配置的数据,重建模型来预测故障,提前进行维护。这需要根据 VRFB 储能系统特性进行建模,其核心是将机理建模方法与数据建模方法融合而成一种混合建模方法。

基于数字孪生技术及 VRFB 储能设备的特性,确立数字孪生系统构建方法的流程。实景物理世界数据模型主要以点云模型和色彩模式 (red, green, blue, RGB) 图像数据为主,形成多源异构数据统一融合模型;在虚拟孪生世界当中以物联网 (internet of things, IoT) 数据驱动模型和降阶模型为主,共同构成了数字孪生模型。在综合考虑电、压、气、温等电池内部电化学环境,并集成产品的技术数据和管理数据的基础上,能实时映射物理世界中产品实际装配、运行、故障、维护等真实状态,从而为复杂产品的设计、制造与运维一体化开发提供依据。VRFB ESS 多物理场数字孪生模型如图 10 所示。

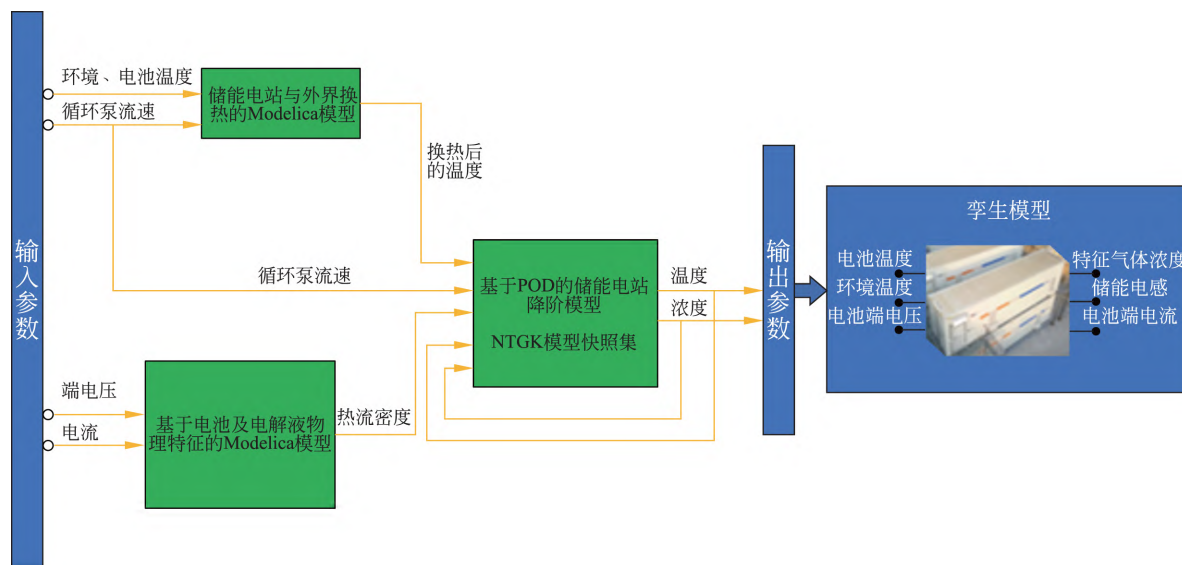


图 10 VRFB ESS 多物理场数字孪生模型

Fig.10 Multi-physical field D.T.model of VRFB ESS

随着输入的数据或经验越来越多,模型会不断改进与完善。数据驱动建模的训练部分可能会遇到与不稳定性相关的问题,然而一旦完成训练,这些模型在使用时是稳定的。多物理场模型构建所测的运行数据包括设备属性和外部参数2部分。静态参量是根据储能电池设备情况及工作环境得到,其为恒定不变的常数,将其作为模型的输入;实时测量的物理量则是通过电压、电流传感器、温度传感器、流量计、液位计、压力变送器、漏液检测等一系列安装在液流电池各结构的高精度传感器得到,一方面用于构建并分析数字孪生体内部模型,另一方面用于验证模型的准确性并进行优化。测得的VRFB运行数据如表2所示。

表2 测得的VRFB运行数据  
Table 2 Measured operation data of VRFB

运行指标	设备属性	外部条件
静态参量	反电动势、正常运行温度范围、临界电流、正常运行电压范围、额定功率	起始温度、经济额定功率范围
实时测量	温度、循环泵流速、压力、漏液检测	环境温度

建立基于数据驱动构建实时仿真的多物理场(温度、电压、电流、流量、液位、压力、漏液检测、气体检测等)数字孪生模型,数据驱动可绕过复杂的物理建模过程并利用输入输出数据很好地描述物理过程。结合储能系统的监测数据、试验数据等,利用机器学习方法构造出输入数据与输出数据之间的数据模型,对储能系统运行的物理现象和机理用数据模型进行表征,完成对设备的孪生。

## 2.6 仿真分析

对优化设计后的VRFB ESS进行仿真分析,图11为配置储能前后风电场功率波形曲线。

通过仿真分析,风电场的原始输出功率波动很大,偏离了发电计划,而加入了5 h长时液流储能其增益输出可较大幅度地降低功率输出上升速率,降低输出功率下降速率,同时可有效解决弃风限电的问题,削峰率达16%,限电量由原来的45%下降到14%以下,表明5 h的长时储能系统具有很好的风电接纳效果,提高了风电消纳带来的收益。

## 3 结论

本文研究了面向新能源风光大基地的VRFB ESS的优化设计方法和技术,综合考虑储能的功率

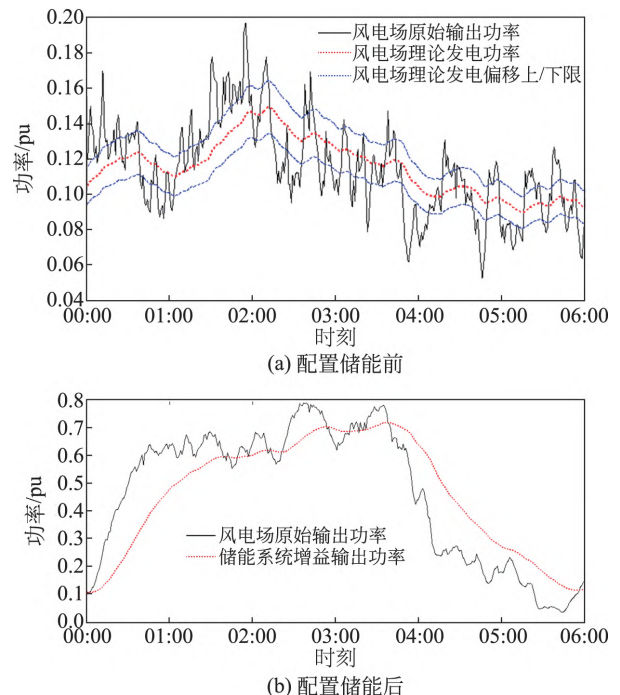


图11 风电场功率波形曲线

Fig.11 Wave curve of wind power

与容量配比、系统集成、能量回收型热管理、智能运维等关键因素方面,提出了全钒液流ESS优化设计的理论方法,所得结论如下:

(1) 通过对新能源发电运行规律、限电问题的分析,建立以新能源发电消纳最大化为目标的优化设计数学模型,找出发电收益随储能额定功率和最大储能容量变化的函数,求解目标函数中发电收益的最大值,计算最大化运行收益,从而获得成本和效益的最优储能规模配置方案,可将风电场限电量由原来的45%下降到14%。

(2) 在系统集成上,以储能模块为基本单元,对储能逆变升压汇流单元进行优化设计,将庞大复杂的液流电池储能系统工程产品化、电池模块化和系统集成化,实现了快速部署,减少占地面积15%。

(3) 从提高ESS综合效率和电热互补的角度,建立能量回收型热管理数学模型、效能提升模型,计算了能量回收的利用量和提升效率,并进行了定性定量分析,提出了通过具有能量回收功能的热管理系统设计提高系统效率的理论方法,可将系统效率从70%提升至90%左右。

(4) 提出了一种针对VRFB基于数字孪生的多源数据融合状态监测运维技术,基于数据驱动和模型驱动构建3维虚拟孪生模型,通过多源数据信息融合、3维实景模型搭建虚拟储能系统,形成多物理场数字孪生模型,为储能系统安全预警和健康状态的评估提供了可靠保障。



## 参考文献

- [1] 赵书强, 刘大正, 谢宇琪, 等. 基于相关机会目标规划的风光储联合发电系统储能调度策略. [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 30-35.  
ZHAO Shuqiang, LIU Dazheng, XIE Yuqi, et al. Scheduling strategy of energy storage in wind-solar battery hybrid power system based on dependent-chance goal programming [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 30-35.
- [2] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 54-58.  
ZHANG Buhuan, ZENG Jie, MAO Chengxiong, et al. Improvement of power quality and stability of wind farms connected to power grid by battery energy storages system [J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 54-58.
- [3] 布鲁奈特. 储能技术[M]. 唐西胜, 译. 北京: 机械工业出版社, 2013: 28.
- [4] 戚永志, 刘玉田. 风光储联合系统输出功率滚动优化与实时控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 265-273.  
QI Yongzhi, LIU Yutian. Output power rolling optimization and real-time control in wind-photovoltaic storage hybrid system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 265-273.
- [5] 陈晓光, 杨秀媛, 卜思齐, 等. 考虑经济功能性的风电场储能系统容量配置[J]. 发电技术, 2022, 43(2): 341-352.  
CHEN Xiaoguang, YANG Xiuyuan, BU Siqi, et al. Capacity allocation of wind farm energy storage system considering economic function[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 341-352.
- [6] 王苏蓬, 张新慧, 吴文浩, 等. 用于风电平抑的混合储能选型和容量优化配置方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(9): 16-23.  
WANG Supeng, ZHANG Xinhui, WU Wenhao, et al. Hybrid energy storage selection and capacity optimization configuration method for wind power smoothing[J]. Smart Power, 2021, 49(9): 16-23.
- [7] 王芝茗. 大规模风电场储能电站建设与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017: 29.
- [8] CHIENG S C, KAZACOS M, SKYLLAS-KAZACOS M. Preparation and evaluation of composite membrane for vanadium redox battery applications[J]. Journal of Power Sources, 1992, 39(1): 11-19.
- [9] 陈玉华. 新型清洁能源技术: 化学和太阳能电池新技术[M]. 北京: 知识产权出版社, 2019: 117.
- [10] Mckinsey & Company. Net-zero power: Long duration energy storage for a renewable grid [R]. LDES Council; McKinsey & Company, 2021.
- [11] YANG Z, ZHANG J. Electrochemical energy storage for green grid[J]. Chemical Reviews, 2011, 111(5): 3577-3613.
- [12] KAZACOS S M, CHAKRABARTI M H. Progress in flow battery research and development[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2011, 158(8): 55-79.
- [13] 刘宗浩, 邹毅, 高素军. 电力储能用液流电池技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022: 262.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 风光储联合发电站设计标准: GB/T 51437—2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021: 11.
- [15] 刘纪福. 余热回收原理与设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2016: 331.
- [16] KHARLAMOV E, MARTIN-RECUERDA F, PERRY B, et al. Towards semantically enhanced digital twins[C]//Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Big Data. Seattle, USA: IEEE, 2018: 4189-4193.
- [17] 唐西胜, 齐智平, 孔力. 电力储能技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019: 87.

收稿日期: 2023-01-03

作者简介:

苗建军(1970), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为液流电池储能技术及系统解决方案, miaojjnet@163.com。



苗建军