

新能源发电功率预测支持下的储能系统优化研究

王子榕, 王建民, 武 军

(中广核新能源投资(深圳)有限公司内蒙古分公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 随着全球能源结构的转型, 新能源发电成为电力系统的重要组成部分。然而, 由于风能和太阳能的间歇性和不可预测性, 对电网稳定性和供电可靠性提出了新的挑战。因此, 本文通过对储能系统等效模型与拓扑结构分析, 基于自适应 LSTM 的功率预测方法研究, 以实现新能源功率输出的平抑和电网负荷的均衡, 对风光互补的储能优化配置进行研究, 了解风光储联合系统的交直流拓扑结构以及风光功率平抑及储能配置方法等, 旨在为新能源并网提供稳健的支持, 优化储能利用, 提升系统经济效益。

关键词: 新能源; 发电功率; 储能系统; 电路模型

中图分类号: TM73

文献标识码: A

DOI: 10.12230/j.issn.2095-6657.2024.06.035

在全球能源转型的大背景下, 新能源发电如风能和太阳能由于其清洁和可再生的特性, 正逐渐成为电力系统的关键支撑。然而, 这些能源的固有间歇性和不确定性对电网的稳定性和供电的可靠性构成了挑战。为此, 本研究致力于解决这个问题, 旨在开发先进的储能配置策略, 以实现风力和光伏发电的有效互补。研究核心集中在如何通过精确的功率预测和智能的储能配置, 优化新能源发电系统的性能, 同时保证电网的稳定运行。

确保发电系统的稳定运行和能量输出的最大化。因此, 对等效电路模型的深入分析是实现储能系统优化的基础, 能够提供有效的数据支持和理论依据, 对于提高新能源发电的整体效率和可靠性至关重要^[1]。

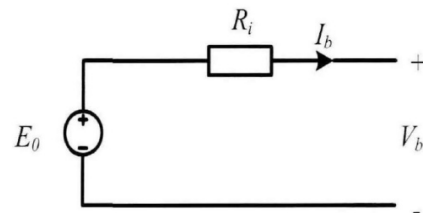


图1 蓄电池等效电路简化模型

1 储能系统等效模型与拓扑结构分析

1.1 蓄电池等效电路模型

在新能源发电功率预测支持下的储能系统优化研究领域, 蓄电池等效电路模型是分析和设计的关键组成部分。如图1所构建的简化等效电路图, 涵盖了蓄电池的基本电气特性, 其中 E_0 代表蓄电池的开路电压, 即在无负载条件下的电池端电压, 它是能量转换与存储过程中的基准值。 R_i 是内阻, 表示蓄电池在充放电过程中遇到的内部电阻, 它与电池的温度、荷电状态(SOC)、老化程度等因素息息相关, 对蓄电池的充放电效率、功率密度及能量密度有直接影响。 I_b 是电池的充放电电流, 其变化直接反映在端电压 V_b 的变化上。在进行储能系统优化时, 需实时监测这些参数, 结合先进的功率预测算法, 如基于机器学习的时间序列预测, 动态调整储能单元的充放电策略, 以适应可再生能源如风能、太阳能的功率波动,

1.2 双向 DC-DC 控制技术与拓扑结构

在“新能源发电功率预测支持下的储能系统优化研究”领域, 双向 DC-DC 控制技术与结构拓扑的研究对于提高储能系统的调节能力和适应性具有重要意义。一种双向 DC-DC 转换器的双闭环模型, 其转换器能够在储能单元与直流母线间实现双向能量流动。图中直流参考电压 V_{dc_ref} 和直流电流 I_{ref} 分别是系统的控制目标, 通过闭环控制系统, 可以实现精确调控, 确保电网与储能系统间的电能质量和供需平衡。控制系统包括电压与电流的反馈调节环节, 确保输出电压 V_{dc} 与参考值保持一致, 且通过调制 Duty 比 D 来精确控制开关管的导通与截止。通过功率预测信息, 控制策略可动态调整转换器的工作状态, 以适配风电、光伏等新能源的功率波动, 优化储能单元的充放电过程, 实现能量的高效管理。

2 基于自适应 LSTM 的功率预测方法研究

2.1 基于自适应 LSTM 的功率预测模型

在新能源发电功率预测支持下的储能系统优化研究中，基于自适应长短期记忆网络（LSTM）的功率预测模型是提高预测准确度的关键技术。如图 2 所示，展示了自适应 LSTM 功率预测模型结构，自适应 LSTM 模型作为核心预测工具，其输入数据来自太阳能板等新能源发电设备的历史功率数据。自适应 LSTM 模型通过学习功率时间序列的长期依赖关系，能够准确捕捉到新能源功率输出的非线性特性和时间动态性。该模型与生成对抗网络（GAN）和支持向量机（SVM）并行，共同作为集成学习系统的一部分，以提高整体预测的精度和鲁棒性。集成学习框架通过多模型的输出构建优化的预测结果，这样可以兼顾各个模型的特点，降低偶发误差的影响，并提升系统对未知数据模式的适应能力。在自适应 LSTM 模型中，通过动态调整网络参数，对不同时间尺度和变化趋势的新能源功率进行预测，从而为储能系统的充放电策略提供可靠的数据支持。

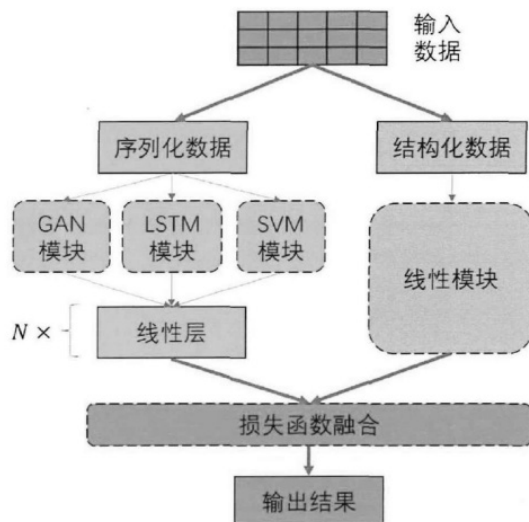


图 2 自适应 LSTM 的功率预测模型

2.2 光伏发电功率预测算例分析

光伏发电功率预测算例需专注于实际可应用的技术性分析，通常基于历史天气数据和光伏系统性能参数构建，通过公式 1 进行功率预测。

$$P_{\text{预}}(t) = P_{\text{光}}(G(t), T_{\text{环}}(t), T_{\text{模}}(t), \eta(t)) \quad (1)$$

其中 $P_{\text{预}}(t)$ 是预测时间 t 的光伏输出功率， $G(t)$ 为辐照度，单位为 W/m^2 ，是光伏板直接接受太阳辐射的强度； $T_{\text{环}}(t)$ 和 $T_{\text{模}}(t)$ 分别表示环境温度和光伏模块表面温度，这两者都对光伏电池的效率产生影响； $\eta(t)$ 是光伏系统的转换效率，可

以随着设备老化或者清洁程度变化而变化。

算例分析中，需特别关注辐照度和温度对光伏发电效率的影响。辐照度是光伏发电的直接动力，而温度会影响光伏电池的化学反应速率，进而影响输出功率。转换效率的动态预测需要结合历史数据与即时监测数据，通过数据驱动的方法细化光伏模型。

2.3 风力发电功率预测算例分析

风力发电功率预测通常依赖于风速和风向等关键气象参数。基于自适应 LSTM 的预测模型可以通过公式 2 表述。

$$P_{\text{风}}(t) = \rho \cdot A \cdot C_p(v(t), \theta(t)) \cdot \frac{v(t)^3}{2} \quad (2)$$

其中， $P_{\text{风}}(t)$ 是在时间 t 的预测风力发电功率， ρ 是空气密度， A 是风轮的横截面积， C_p 是功率系数，取决于风速 $v(t)$ 和风轮叶片的角度 $\theta(t)$ 。功率系数 C_p 是衡量风轮效率的关键参数，与风轮的设计和状态密切相关。自适应 LSTM 模型通过长短期记忆单元对历史风速和功率数据进行学习，能够捕捉到复杂的时间序列特性，预测未来风力发电的功率输出。例如，考虑某地区在一年中的风速时间序列数据集，通过训练自适应 LSTM 模型，可以对未来一周的风电功率进行预测。算例可能使用的数据集包含风速为 $7\text{m/s} \sim 15\text{m/s}$ ，空气密度为 $1.225\text{kg}/\text{m}^3$ ，风轮横截面积为 30m^2 ，功率系数在 $0.4 \sim 0.5$ 之间变化。

通过对此数据进行训练和验证，自适应 LSTM 模型能够为储能系统的充电策略提供高准确率的风电功率预测。这对于平衡供需，特别是在风速变化大的场景下，提供了重要支持。预测结果还可以指导储能系统的优化，例如，在预测到高功率输出时，储能系统可以减少充电，以准备在低功率输出期间释放能量^[2]。

3 考虑风光互补的储能优化配置研究

3.1 风光储联合系统的交直流拓扑结构

风光储联合系统的交直流拓扑结构设计效果对本文研究内容有着重要性作用。结合图 3 所示，该系统结构由风力发电单元、光伏发电单元、储能单元以及相应的变流装置组成，并通过高压交流（AC）电网实现能量的输出。

在此拓扑结构中，风电和光伏单元通过各自的直流（DC）侧进行功率收集，然后通过相应的变流器转换为交流（AC），以适配高压交流电网的输电标准。对于风电单元，考虑到风速

的波动性，可以通过功率预测模型，如 $P_{\text{风}} = \frac{1}{2} \rho A C_p v^3$ ，来估计风电功率，其中 ρ 为空气密度， A 为叶片横截面积， C_p 为功率系数， v 为风速。光伏单元则通过 $P_{\text{光}} = GA\eta$ 进行功率预测， G 为太阳辐照度， η 为光伏转换效率。

储能单元则充当系统的调节器，不仅可以在风力和光伏发电不足时释放能量，也可以在能量过剩时存储能量。其充放电行为可通过 $E = \int P(t) dt$ 进行描述，其中 E 代表储能单元的能量状态， $P(t)$ 为充放电功率。

交直流侧的配置允许系统在风光发电单元间实现能量的互补与平衡，通过实时的功率预测和能量管理策略，确保系统的稳定性和可靠性。同时，通过变流装置的协调控制，可以优化交流侧的电压和频率，实现与电网的无缝对接。此类系统拓扑结构在提升新能源并网效率、降低能源浪费以及增强系统适应性方面发挥着重要作用。在发电系统优化设计中，风光储联合系统的交直流拓扑结构设计不仅要考虑技术性指标，如转换效率和系统稳定性，还要考虑经济性和环境适应性，以实现新能源发电的高效利用和储能系统的优化配置^[3]。

3.2 风光功率平抑及储能配置方法

风光发电系统的功率波动性高，直接影响电网稳定和储能配置效率。为此，采用卡尔曼滤波算法可以有效地进行功率预测，进而实现功率平抑。卡尔曼滤波是一种递归滤波器，能够从一系列含有噪声的测量中估计动态系统的状态。对于风光储联合系统，可以设定状态变量为系统功率输出，测量值为实际功率输出。卡尔曼滤波算法可以通过公式 3 进行描述。

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_k$$

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (3)$$

其中 $\hat{x}_{k|k-1}$ 是在时刻 k 之前的状态预测， F_k 是状态转移矩阵，反映了从时刻 $k-1$ 到时刻 k 的系统演变过程， B_k 是控制输入矩阵，与外部控制向量 u_k 相乘， $P_{k|k-1}$ 是预测状态协方差，表示预测的不确定性， Q_k 是过程噪声协方差矩阵， K_k 是卡尔曼增益，用于权衡预测与实际测量的不确定性， H_k 是观测矩阵，将状态变量转换为测量空间， R_k 是观测噪声协方差矩阵，通过卡尔曼滤波算法，可以在每个时间步连续地更新风光系统的功率输出预测，从而为储能系统的充放电策略提供更加准确的数据基础。基于预测的功率输出，可以设定储能系统的功率缓冲目标，并配置相应容量的储能单元以满足电网的稳定性需求。储能配置可通过优化模型求解，以最小化储能系统的运行成本和功率波动对电网的影响。

3.3 不同配置方式的储能容量算例分析

储能容量的优化配置不仅需要考虑功率平抑的需求，还需考虑经济性和系统的可靠性。以下是一个储能容量算例分析的框架，其中涵盖了不同配置方式下的储能容量需求。首先，需要确定风光发电系统的功率输出波动范围。其次，可以通过历史数据分析得出，并以此为基础建立功率波动模型，例如风力发电功率的标准差 $\sigma_{\text{风}}$ 和光伏发电功率的标准差 $\sigma_{\text{光伏}}$ 。最后，根据功率波动模型，储能容量可以通过公式 4 计算。

$$C_{\text{储}} = \alpha \times (\sigma_{\text{风}} + \sigma_{\text{光伏}}) \times T \quad (4)$$

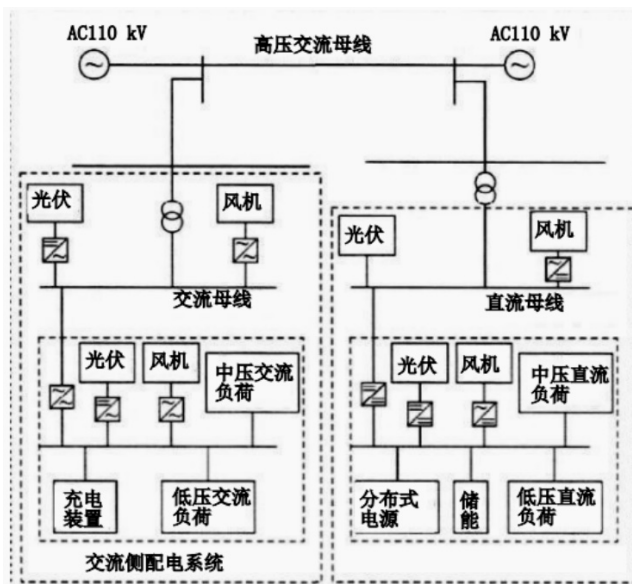


图 3 风光储联合系统的交直流拓扑结构

表1 不同置信系数和 DOD 下的储能容量需求

置信系数 α	标准差 $\sigma_{\text{风}}$ (MW)	标准差 $\sigma_{\text{光}}$ (MW)	时间周期T (小时)	DOD (%)	循环效率 η (%)	需求储能容量 $C_{\text{储}}$ (MW·h)	实际储能容量 $C_{\text{实}}$ (MW·h)
1.0	2	3	4	80	90	计算结果	计算结果
1.5	2	3	4	50	90	计算结果	计算结果
2.0	2	3	4	80	85	计算结果	计算结果
2.5	2	3	4	50	85	计算结果	计算结果

其中, $C_{\text{储}}$ 是储能容量, α 是覆盖功率波动的置信系数, T 是考虑的时间周期。接下来, 根据储能单元的放电深度 (DOD) 和循环效率 η , 可以利用公式 5 进一步细化储能容量计算。

$$C_{\text{实}} = \frac{C_{\text{储}}}{DOD \times \eta} \quad (5)$$

基于上述模型, 可以构建一个数据表 (如表 1 所示), 展示不同置信系数和 DOD 下的储能容量需求。

在此数据表中, 每一行代表不同的配置情况, 考虑到置信系数的不同选择可能会影响到所需的储能容量。通过对这些数据的分析, 能够为风光互补储能系统的设计提供定量的决策依据。此外, 分析还应该考虑到储能成本、寿命及其他经济因素, 以确保所提出的储能配置方案在经济上是可行的。通过这种方式, 可以确保风光互补系统的电力供应更加平稳可靠, 同时也能够提高系统的经济效益。

4 结语

综上所述, 经过详尽的研究和多方面的算例分析, 本研究展示了不同配置方式下储能容量的确定方法及其对电网稳定性的影响。通过采用自适应算法和卡尔曼滤波器对风光功率进行

预测, 并对储能容量进行优化配置, 本研究成功平抑了由新能源波动性引起的功率波动, 确保了电力系统的高效和可靠运行。结果表明, 合理配置储能容量能够有效地降低能源浪费, 提高能源利用效率, 并降低系统运营成本。本研究为新能源发电领域提供了实用的技术路线, 对促进可持续发展的能源系统构建具有重要的理论和实践价值。

参考文献:

- [1] 杨玉鹏, 保伟中. 储能系统降低风功率预测考核费用研究 [J]. 风力发电, 2022, (04): 17-21.
- [2] 宋山茂. 分布式储能系统光伏功率共享性能优化方案研究 [J]. 能源与节能, 2023, (03): 215-218.
- [3] 孙培锋, 冯云岗, 卢海勇, 等. 新能源发电工程储能系统容量/功率优化配置 [J]. 上海节能, 2021, (01): 98-103.

作者简介: 王子榕 (1988-), 男, 河北唐山人, 大学本科, 工程师, 主要从事输变电、新能源发电研究。