

含风储一体化电站的电力系统多目标风险调度模型

孙 辉¹, 刘 鑫¹, 贲 驰², 余建明³, 胡姝博¹, 周 玮¹

(1. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁省大连市 116024; 2. 国网东北电网有限公司, 辽宁省沈阳市 110180;

3. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司(北京), 北京市 100192)

摘要: 风储一体化运行是未来风电站的一种发展趋势,与储能和风电分别受系统调度相比较,更有利于提高风电接入电网的利用率。基于一体化电站中电池储能系统的运行特性及风机故障机理,提出考虑含风储一体化电站的电力系统失负荷和弃风风险指标,建立以系统运行风险最小、火电机组煤耗量最少,以及弃风量最少的多目标优化调度模型,以解决系统运行过程中风险、发电成本与风电消纳之间的矛盾。算例验证表明,与传统风储联合运行模式下的调度结果相比,一体化后虽然风险略有增加,但显著提高了系统运行的经济性和风电消纳能力。

关键词: 风力发电; 风险; 优化调度; 电池储能; 多目标

0 引言

近年来,随着储能技术的发展,储能系统和风电场联合运行作为缓解风电不可控性的有效方法之一也得到快速发展^[1]。2017 年青海省发改委发布文件,规定所规划的 3 300 MW 风电项目,其各项目按照建设规模的 10% 配套建设储能装置,储能设施总规模 330 MW^[2]。含有储能的风储一体化电站接入电网,可以降低风电功率波动,提高风电站利用率,风电和储能系统的一体化是未来风电站发展的一种模式。

风储联合运行包括传统的可调度储能和风储一体化两种模式。前者的储能系统单独受调度中心控制,与风电出力之间没有直接联系^[3]。可调度储能模式下的风储联合运行系统优化调度问题中,储能的作用主要体现为平抑风电波动^[4]、跟踪计划出力^[5]、削峰填谷^[6]及提供备用^[7]等,能提高风电利用率及接入电网可靠性,但未能明确考虑系统风险水平^[8]。通过引入风险定量约束,文献[9-11]提出了考虑风险的风储联合运行系统优化调度模型。其中,文献[9]考虑了多种储能运行策略,文献[10]以条件风险价值的方式处理储能风险,但都未计及储能和风机故障失效概率。以风险指标为调度目标,建立相关调度模型^[12-17],其中,文献[12]建立两阶段模型,利用储能系统来平抑风电功率的波动,通过合理弃风和切负荷提高经济性,但未对风险进行量化;

文献[13]考虑了电池储能故障,以及风机尾流效应和降额运行给电网运行带来的风险,但风险分析以风机为重点,储能的风险分析不够全面;文献[14]对预防控制和校正控制合理协调,进行了多时间尺度风险调度,文献[15]提出火储协调双层规划模型,以解决风电随机性引起的风险,但均未能对储能和风机故障进行讨论。

风储一体化模式的储能系统仅支持所在风电站的风电机组,其运行方式和管理策略只受风电站控制,构成风储一体化电站^[18]。相关研究主要集中在一体化电站容量规划^[19]和建模仿真研究^[20],目前关于含有风储一体化电站的优化调度研究很少,且未能计及系统存在的风险问题。然而,风电和储能的失效及储能系统不同的管理策略会影响一体化电站功率输出特性,给系统带来的风险不可忽略。传统模式下的调度方法难以直接应用到一体化后的调度问题中,必须开展含风储一体化电站的电力系统优化调度研究。

本文在分析风储一体化电站运行方式、功率输出特性的基础上,考虑其中储能和风机的故障失效给系统运行带来的失负荷和弃风风险,建立含有风储一体化电站的电力系统多目标优化调度模型^[21],通过算例验证本文所提模型的合理性和优越性。

1 风储一体化电站运行方式

风储一体化电站中,电池储能系统仅辅助风电场接入电网,日前调度的主要任务是按风电站内调度计划要求,作为场内可调度资源,实现削峰填谷。风储一体化电站输出功率 P_{wBess} 如式(1),由电池储

能系统和风电共同决定。

$$P_{wBess} = P_w - P_{Bess} \quad (1)$$

式中: P_w 为风电功率; P_{Bess} 为电池储能功率, 正负表示充放电状态, 正表示充电、负表示放电。

其中风电出力满足:

$$0 \leq P_w \leq \min(P_{w0}, P_{wmax}) \quad (2)$$

式中: P_{w0} 为风电预测功率; P_{wmax} 为风机额定功率。

对调度中心, 风储一体化电站的可调度范围应小于风电场额定功率, 即

$$0 \leq P_{wBess} \leq P_{wmax} \quad (3)$$

在实际运行中, 对于风电接入功率受到限制的运行方式, 存在弃风情况, 即风电利用率不同。图1所示为风电接入功率受到限制时两种风储联合运行出力对比。图中: P_{wLimit} 表示风电并网功率限制。

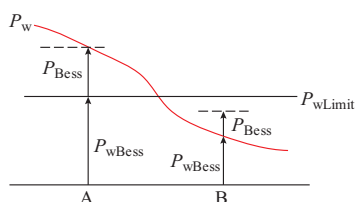


图1 风储一体化电站风储联合运行方式

Fig.1 Operation mode of power station with integrated wind power and energy storage

由于风电优先上网, 可调度储能模式风电站出力为 $\min(P_w, P_{wLimit})$ 。在图1中取场景A和B: 对于场景A有 $P_w > P_{wLimit}$, 按照调度要求 $P_{wBess} = P_{wLimit}$, 风储一体化电站通过风储配合, 储能吸收多余风电功率, 使得风机实际出力超过 P_{wLimit} , 与可调度储能模式相比较, 提高了风电利用率; 对于场景B有 $P_w < P_{wLimit}$ 。两种风储联合运行模式出力等同于“以风定电”的情况, 风电利用率相同。

2 风储一体化电站风险模型

风储一体化电站风险由风机故障失效和电池储能系统故障失效构成, 使一体化电站整体对外出力功率缺失或过量, 给电力系统运行带来失负荷和弃风的风险。

2.1 风电机组故障失效模型

除了风机本身的故障率以外, 不同风速引起的额外故障率^[22]为:

$$\lambda_{wind} = \lambda_0 + \Delta\lambda_{wind}(v) \quad (4)$$

式中: λ_0 为风机的基本故障率。

故障率增量 $\Delta\lambda_{wind}(v)$ 与风速大小 v 成二次关系, 即

$$\Delta\lambda_{wind}(v) = k_{wind} + \frac{\lambda_{max} v^2 - \lambda_{min} v^2}{v_{co}^2 - v_{ci}^2} \quad (5)$$

式中: v_{co} 为切出风速, λ_{max} 为其对应故障率; v_{ci} 为切入风速, λ_{min} 为其对应故障率; k_{wind} 为与切入风速、切出风速有关的常数。

风速和风电功率对应关系如下^[23]:

$$P_{wind} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v < v_{ci} \\ a + bv^3 & v_{ci} \leq v < v_{cr} \\ P_{wmax} & v_{cr} \leq v < v_{co} \\ 0 & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$a = \frac{P_{wmax} v_{ci}^3}{v_{cr}^3 - v_{ci}^3} \quad b = \frac{P_{wmax}}{v_{cr}^3 - v_{ci}^3}$$

v_{cr} 为额定风速。

通过式(5)和式(6)可确定风电功率和故障率增量的关系。

2.2 电池储能系统故障失效模型

电池储能系统由电池模块组、能量转换系统(PCS)、滤波器、电池管理系统(BMS)、控制单元及能量管理系统(EMS)等部分串联组成(结构如附录A图A1所示)^[24]。电池储能系统故障存在整体失效和部分失效。

对于储能系统整体失效, 其失效率为系统各单元失效率之和。其中储能模块整体失效率由统计数据得出; 对于电池储能系统中的电力电子元件(包括晶体管和二极管、滤波器、变压器)的失效率按文献^[25]给出的方法计算, 并在此基础上, 再根据各单元的物理结构计算出各单元失效率。

储能系统部分失效指的是电池储能子模块故障或停运, 子模块受电池管理系统单独控制, 某个子模块故障或者检修停运, 不会影响电池储能系统整体运行, 但额定容量和额定功率会减小, 造成储能部分功率缺失。

对有 n 个电池子模块组成的电池储能系统部分失效率为:

$$\lambda_{Bess,i}^{part} = C_n^i \lambda_{Bess}^{solo} i \quad (7)$$

式中: i 为失效子模块个数; $\lambda_{Bess,i}^{part}$ 为 i 个子模块同时故障的失效率; λ_{Bess}^{solo} 为单个子模块的失效率。

随着使用年限的增长, 其故障失效的概率分布服从两参数指数函数 $F_k(k)$ ^[26]:

$$F_k(k) = 1 - e^{-\lambda_k(k-k_0)} \quad (8)$$

式中: λ_k 为失效率, 即在 k 时刻后单位时间内发生失效的概率; k_0 为电池最小保证寿命。

3 含风储一体化电站的电力系统运行风险分析与建模

运行风险是对电力系统不确定性因素给出的可能性和严重性的综合量度, 即风险包含两个方面: 事

件发生的概率和事件发生后造成的严重后果。数学定义式为^[27]:

$$R_{\text{Risk}}(X) = \sum_i P(E_i)S(E_i) \quad (9)$$

式中: X 为当前系统状态; E_i 为系统第 i 个不确定因素; $P(E_i)$ 为第 i 个不确定因素发生的概率; $S(E_i)$ 为第 i 个不确定因素引发的后果严重性。

1) 不确定因素发生的概率。含风储一体化电站的系统运行风险的概率 $P(E_i)$ 包括电池储能系统部分功率缺失概率、故障失效概率、风机故障概率, 以及火电机组强迫停运概率。

2) 不确定性引起的严重性后果。由上述不确定性引起的严重性后果 $S(E_i)$ 包括储能和风机故障且备用调节后造成的失负荷量和弃风量, 以及系统火电机组停运后造成的失负荷量。

考虑电池储能和风机运行不可靠性, 系统弃风量 $P_{\text{dis,LW}}^{\text{wBess}}$ 、失负荷量 $P_{\text{dis,LL}}^{\text{wBess}}$, 以及系统有功功率失衡总量 $P_{\text{dis}}^{\text{wBess}}$ 的表达式分别为:

$$P_{\text{dis,LW}}^{\text{wBess}} = \max\left(\sum_{i=1}^{N_G} P_{G,i} + P_{\text{wBess}}^{\text{dam}} - P_L + R_{\text{Bess}}, 0\right) \quad (10)$$

$$P_{\text{dis,LL}}^{\text{wBess}} = \max\left(P_L - \left(\sum_{i=1}^{N_G} P_{G,i} + P_{\text{wBess}}^{\text{dam}}\right) + R_{\text{Bess}}, 0\right) \quad (11)$$

$$P_{\text{dis}}^{\text{wBess}} = P_{\text{dis,LW}}^{\text{wBess}} + P_{\text{dis,LL}}^{\text{wBess}} \quad (12)$$

式中: $P_{G,i}$ 为第 i 台火电机组有功出力; N_G 为火电机组个数; $P_{\text{wBess}}^{\text{dam}}$ 为考虑了电池储能系统和风机故障失效后的风储一体化电站功率; R_{Bess} 为备用响应功率; P_L 为系统总的负荷功率。

考虑火电机组强迫停运造成严重性后果的系统失负荷量 $P_{\text{dis}}^{P_{G,j}}$ 表达式为:

$$P_{\text{dis}}^{P_{G,j}} = P_L - \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N_G} P_{G,i} + P_{\text{wBess}}\right) \quad (13)$$

式中: j 为故障机组。

3) 系统运行风险指标。系统运行风险指标 R_{Risk} 的表达式为:

$$R_{\text{Risk}} = \lambda_{\text{Bess}} P_{\text{dis}}^{\text{Bess}} + \sum_{i=1}^n \lambda_{\text{Bess},i}^{\text{part}} P_{\text{dis}}^{\text{Bess,part}} + \lambda_{\text{wind}} P_{\text{dis}}^{\text{wind}} + \sum_{j=1}^{N_G} \lambda_{P_{G,j}} P_{\text{dis}}^{P_{G,j}} \quad (14)$$

式中: λ_{Bess} 为电池储能完全故障失效概率; λ_{wind} 为风机故障失效概率; $\lambda_{P_{G,j}}$ 为第 j 台机组强迫停运率; $\lambda_{\text{Bess},i}^{\text{part}}$ 为电池储能 i 个子模块故障失效概率; $P_{\text{dis}}^{\text{Bess}}$ 为电池储能系统完全故障失效后的有功功率不平衡量; $P_{\text{dis},i}^{\text{Bess,part}}$ 为电池储能 i 个子模块失效后系统有功

功率不平衡量; $P_{\text{dis}}^{\text{wind}}$ 为风机失效后系统有功功率不平衡量; $P_{\text{dis}}^{P_{G,j}}$ 为第 j 台机组停运后系统功率不平衡量。

4 考虑风储一体化运行风险的系统多目标优化调度模型

风储一体化电站中, 风机和电池储能系统同时存在不确定性, 增大了系统的运行风险。因此, 建立电力系统优化调度模型时, 需考虑风储一体化电站运行风险给调度计划带来的影响。发电成本的降低和风电消纳量的增加是以提高系统风险为代价的。为权衡三者之间的关系并解决矛盾冲突问题, 本文以系统运行煤耗量、风险和弃风量共同作为目标, 建立优化调度模型, 并采用多目标处理方法, 旨在降低系统运行煤耗量和提高风电利用率的同时, 尽可能减小系统运行风险。

4.1 目标函数

目标函数 1: 火电机组煤耗量指标, 即火电厂发电煤耗最低。

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i \quad (15)$$

式中: a_i, b_i, c_i 为煤耗系数; T 为时段总数; 下标 t 表示在 t 时段下各物理量的值, 后文的 t 有相同的含义; $P_{i,t}$ 为 t 时段第 i 台火电机组出力。

目标函数 2: 风险指标, 系统日前调度每个时段的风险累积。

$$\min F_2 = \sum_{t=1}^T R_{\text{Risk},t} \quad (16)$$

式中: $R_{\text{Risk},t}$ 为 t 时段含有风储一体化电站系统的风险指标。

目标函数 3: 弃风量, 系统各个时段弃风量之和最小, 即风电利用率最大。本文没有考虑风电随机性, 认为风电波动功率可由备用抵消。

$$\min F_3 = \sum_{t=1}^T (P_{\text{w0},t} - P_{\text{w},t}) \quad (17)$$

参照模糊集理论, 采用隶属度函数 F 来描述各目标函数优化结果^[28], 其取值在 $0 \sim 1$ 之间, $F=0$ 表示离最优结果最近, 最令人满意; $F=1$ 表示结果最不令人满意。 F 表达式为:

$$F_i(X) = \frac{f_i(X) - f_i(X_i^*)}{f_{i\text{w}} - f_i(X_i^*)} \quad (18)$$

式中: $F_i(X)$ 为目标函数 $f_i(X)$ 的隶属度函数, 是目标函数 $f_i(X)$ 单目标优化时的最优策略; $f_{i\text{w}}$ 为目标函数 $f_i(X)$ 在各单目标最优策略 X_i^* 中的最劣取值。

利用线性加权求和法将多目标优化转化为单目

标优化问题:

$$F = \min \sum_{i=1}^3 w_i F_i \quad (19)$$

式中: w_i 为权重,是调度对各个目标的重视程度,可以根据不同的风险水平计算权重,且 $\sum_{i=1}^3 w_i = 1$ 。

4.2 约束条件

1) 火电单元出力约束

$$P_{G,i}^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_{G,i}^{\max} \quad (20)$$

式中: $P_{G,i}^{\max}$ 和 $P_{G,i}^{\min}$ 分别为火电机组出力上、下限。

2) 机组爬坡率约束

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq u_i \Delta t \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq d_i \Delta t \end{cases} \quad (21)$$

式中: u_i 和 d_i 分别为第 i 台机组向上和向下的爬坡速率; Δt 为单个时段时间。

3) 备用约束

$$\sum_{t=1}^T \min \left(P_{G,i}^{\max} - P_{i,t}, \frac{u_i}{6} \right) \geq 0.02 P_{L,t} + 0.15 P_{w0,t} \quad (22)$$

$$\sum_{t=1}^T \min \left(P_{i,t} - P_{G,i}^{\min}, \frac{u_i}{6} \right) \geq 0.15 P_{w0,t} \quad (23)$$

式(22)、式(23)分别表示系统上、下备用约束,上备用取负荷功率的 2% 和风电预测功率的 15%,下备用取风电预测功率的 15%,公式中除以 6 表示备用 10 min 响应。

4) 风储一体化电站出力约束

$$0 \leq P_{wBess,t} \leq P_{wmax} \quad (24)$$

风机出力约束为:

$$0 \leq P_{w,t} \leq \min(P_{w0,t}, P_{wmax}) \quad (25)$$

5) 储能约束

正常运行时,储能前后时段存在相互制约的关系,如下式:

$$E_{Bess,t_e} = \begin{cases} E_{Bess,t_e-1} - P_{Bess,t} \Delta t \eta_{ch} & P_{Bess,t} \leq 0 \\ E_{Bess,t_e-1} - \frac{P_{Bess,t} \Delta t}{\eta_{dis}} & P_{Bess,t} > 0 \end{cases} \quad (26)$$

式中: $P_{Bess,t}$ 为 t 时段内储能功率; t_e 为时刻数,共 $T+1$ 个时刻; E_{Bess,t_e} 为 t_e 时刻的储能剩余容量; η_{ch} 和 η_{dis} 分别为电池储能充、放电效率。

出现故障时储能前后时段满足如下约束:

$$E_{Bess,t_e} = \begin{cases} E_{Bess,t_e-1} - P_{Bess,t}^{\text{dam}} \Delta t \eta_{ch} & P_{Bess,t}^{\text{dam}} \leq 0 \\ E_{Bess,t_e-1} - \frac{P_{Bess,t}^{\text{dam}} \Delta t}{\eta_{dis}} & P_{Bess,t}^{\text{dam}} > 0 \end{cases} \quad (27)$$

式中: $P_{Bess,t}^{\text{dam}}$ 为 t 时段内储能故障后功率,包括全部缺失和部分缺失。

整个时段功率平衡,对下个调度周期不产生影响,即

$$E_{Bess,0} = E_{Bess,T} \quad (28)$$

长期运行的电池储能系统在一定年限后,其最大充放电功率受到充放电倍率的影响^[29],表示为:

$$-\alpha_{ch}(I_{ch})P_{Bess}^{\max} \leq P_{Bess,t} \leq \alpha_{dis}(I_{dis})P_{Bess}^{\max} \quad (29)$$

式中: I_{ch} 和 I_{dis} 分别为充放电倍率; α_{ch} 和 α_{dis} 分别为与 I_{ch} 和 I_{dis} 有关的充放电倍率影响系数; $P_{Bess}^{\max}$ 为电池储能额定最大充放电功率。

电池的容量受到充放电深度、电池健康状态和温度的影响:

$$\alpha_{Edown}(D, H)E_{Bess}^{\max} \leq E_{Bess,t_e} \leq \alpha_{Eup}(D, H)E_{Bess}^{\max} \quad (30)$$

式中: D 为充放电深度; H 为电池健康状态; α_{Eup} 和 α_{Edown} 分别为与 H 和 D 有关的储能容量系数; $E_{Bess}^{\max}$ 为电池储能初始额定容量。

式(29)、式(30)分别表示考虑了电池储能长期运行特性下的充放电出力约束、容量上下限约束。

6) 系统有功功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{G,i,t} + P_{wBess,t} - P_{L,t} = 0 \quad (31)$$

式中: $P_{L,t}$ 为 t 时段的系统负荷。

4.3 优化方法与步骤

本文模型目标函数是非线性且连续可微凸函数,采用原对偶内点法进行求解^[19],求解步骤如下:①确定系统初始状态,包括各时段火电、风储一体化电站中风电和储能及负荷功率;②选取系统故障集,包括风机故障失效、储能全部失效和部分失效;③分别计算单目标函数并通过隶属度函数描述,再利用线性加权将多目标函数转化为单目标函数;④通过原对偶内点法在约束条件内寻找最优解。

5 算例分析

以 6 机系统为例(详见附录 A 表 A1、表 A2),另外增加一个风储一体化电站,风电场额定功率 250 MW 且优先上网,电站接入电网功率限制为当前时段负荷功率的 15%,电池储能规模为 70 MW/210 MW·h 且由 4 个子模块组成,电池相关数据见附录 A 表 A3 至表 A5。

5.1 考虑风储一体化电站运行风险的调度结果及分析

设系统的风险和煤耗量权重相同且高于弃风指标,取值如下: $w_1 = 0.41$, $w_2 = 0.41$, $w_3 = 0.18$ 。按照 3 个场景针对多种指标进行对比分析:场景 1 为不考虑风险,场景 2 为不考虑电池储能风险,场景 3 为考虑风储一体化风险。

从表 1 可见,场景 3 调度结果煤耗量指标和弃风量均比场景 1 要差,但系统风险相较场景 1 降低 20.2%;场景 2 的煤耗量和弃风量指标均比场景 3 的调度结果要好,但储能系统、风电站、火电厂及系统的风险值均高于场景 3。若储能系统不计其运行风险,则出力增加会增加风电消纳功率,且提高风电利用率,但储能和风电出力增加给系统带来的风险增大也不容忽视。

表 1 3 种场景下多种指标的调度结果
Table 1 Scheduling results of variety of indices in three scenarios

场景	煤耗量/t	系统风险值	储能风险值	风电和火电风险值	弃风量/MW
1	243 620.5	154.5	41.3	113.2	1 078.8
2	244 883.2	136.3	33.6	102.7	1 172.4
3	245 152.1	123.3	24.5	98.8	1 197.9
场景 3 较 1 变化量/%	0.63	-20.2	-40.7	-12.7	11.1

在场景 3 下考虑储能不同年限的故障率增长对调度的影响,以 3 年故障率风险为基准,运行 5 年和 10 年的电池储能故障率增加分别会给系统带来 3.7%和 10.2%的风险值增量,因此随着电池使用年限的增长,储能故障给系统调度带来的风险必须加以考虑。

为分析风速变化对调度结果的影响,本文将风电预测功率分别增加和减少 3%。表 2 所示为风电预测功率尖峰时段(第 3 时段)对应的风机故障率变化和调度结果。

表 2 不同风电预测功率下的调度结果
Table 2 Scheduling results with different forecasting wind power

风电功率	故障率变化/%	煤耗量/t	风险指标	风险值相对增量/%
105%基态值	1.75	244 939.3	133.2	8.0
基态值	0	245 152.1	123.3	0
95%基态值	-1.36	245 358.1	115.6	-6.2

从调度结果可以看出,随着风电功率的增加,风机故障率稍有增大,系统运行风险值增幅较大。

图 2(a)为 3 种场景下各时段电池储能剩余电量调度结果。储能出力与风险指标相关,在调度周期内,计及风险的储能系统,剩余容量变化更为平缓。图 2(b)为 3 种场景下各时段弃风量结果对比。算例中,风电具有反调峰特性,而在风电限制接入负荷为 15%的情况下,风电弃风集中在负荷低谷时段。为了降低风险,风机和储能出力减少,导致负荷低谷时段弃风量增加。

计算结果表明,考虑电池储能系统和风储一体

化运行风险,虽然系统运行的煤耗量和风电利用率相对保守,但风险明显降低,表明考虑风储一体化运行风险有利于系统安全运行。

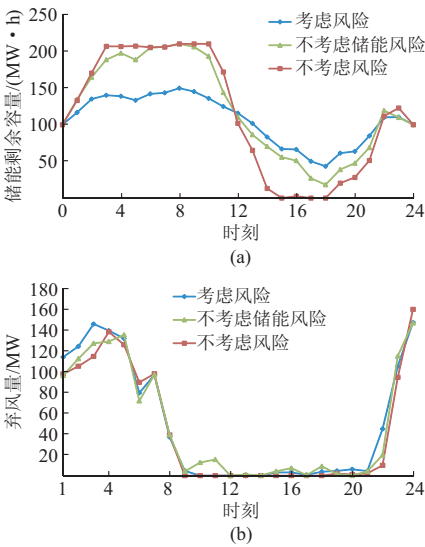


图 2 3 种场景下电池储能各时段剩余容量和弃风量
Fig.2 Residual capacity of battery energy storage and abandoned air volume of wind power station each time in three scenarios

5.2 风储联合不同运行模式对比分析

考虑风险因素,对储能可调度运行与风储一体化运行两种风储联合模式进行风险调度,结果如表 3 所示。

表 3 两种风储联合运行模式风险调度结果对比
Table 3 Comparison of risk scheduling results between two kinds of operation mode with integrated wind power and energy storage

运行模式	煤耗量/t	风险指标	弃风量/MW
可调度储能	246 087.1	118.6	1 291.3
风储一体化	245 152.1	123.3	1 197.9

在风电限制接入负荷为 15%的情况下,风储一体化模式比可调度储能模式经济性低、弃风量少,即风电利用率高,风电和储能出力增加时,系统考虑风险相较于不考虑风险的调度结果下降量少。

图 3(a)和(b)分别表示两种运行模式下的风电出力和风电站出力。在负荷低谷时段,两种模式下风电站出力相同,风储一体化模式的风电出力大于可调度储能模式,风电利用率高;在负荷高峰时段,风电出力相同,风储一体化模式的风电站出力大于可调度储能模式。可见,风储一体化模式提高了风电利用率,而可调度储能模式降低了系统煤耗量。

5.3 电池储能在不同管理策略下的风险调度

充放电管理策略限制了电池储能系统的荷电状态(SOC)和存取能力,以保证储能系统的安全。充

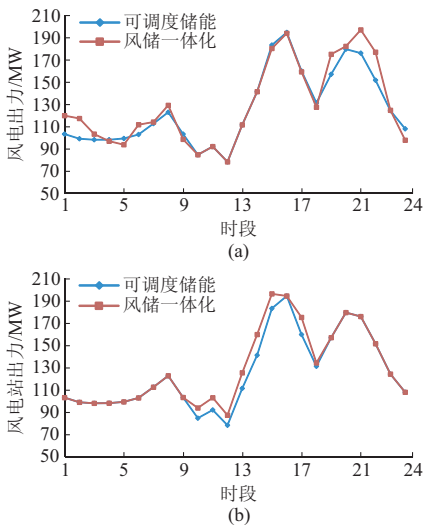


图 3 两种风储联合运行模式下的风电和风电站出力
Fig.3 Wind power and power of wind power station
by two kinds of operation mode with integrated
wind power and energy storage

放电策略的差异对风储一体化电站和系统运行的影响不同,本文以 3 种电池储能系统的充放电策略进行对比分析。

策略 1:储能的充放电没有充电次数和充电时间的约束。

策略 2:为了降低电池寿命损耗,减少电池充放电状态切换次数,需要额外增加电池储能约束,即一日之内实际充放电状态切换次数 N_{dBess} 不大于规定次数 N_{Bess} :

$$N_{dBess} \leq N_{Bess} \tag{32}$$

策略 3:为了减小风电峰谷差,电池储能系统在风电预测功率波峰时段集合 t_{peak} 内仅允许充电,在风电预测功率波谷时段集合 t_{tro} 内仅允许放电。需要额外增加储能约束:

$$\begin{cases} P_{Bess,t} \leq 0 & t \in t_{tro} \\ P_{Bess,t} > 0 & t \in t_{peak} \end{cases} \tag{33}$$

在风储一体化运行模式下,为了保护电池储能系统寿命,通常采用策略 2($N_{Bess} = 2$);为了减少风电反调峰特性对系统的影响,通常采用策略 3 ($t_{peak} = \{1, 2, \dots, 7, 21, 22, 23, 24\}, t_{tro} = \{9, 10, \dots, 14\}$)。

本文针对储能不同管理策略进行风险调度,结果如表 4 所示。

策略 1 的煤耗量和风电利用率优于其他两种策略,因为储能不受自身条件约束,能够更好地辅助风电参与系统调度;策略 3 的系统风险比其他两种策略更低,有利于系统运行安全。

表 4 电池储能不同管理策略下的调度结果
Table 4 Scheduling results under different management strategies for battery energy storage

策略	煤耗量/t	风险指标	弃风量/MW
1	245 152.1	123.3	1 197.9
2	245 324.2	122.5	1 205.6
3	245 632.5	121.6	1 190.3

5.4 风险和煤耗量目标不同比重下的调度结果及分析

为了权衡风储一体化电站给系统运行带来的风险,本文选择不同风险和煤耗量比重,通过定性排序与定量标度相结合的二元对比定权法^[25],确定各目标权重系数,权重选择见附录 A 表 A6。

图 4 中(a)(b)(c)分别表示在不同比重下系统弃风量、煤耗量和风险指标的调度结果,含有风储一体化电站的系统风险权重增大,系统风险指标下降。各场景含义见附录 A 表 A6。

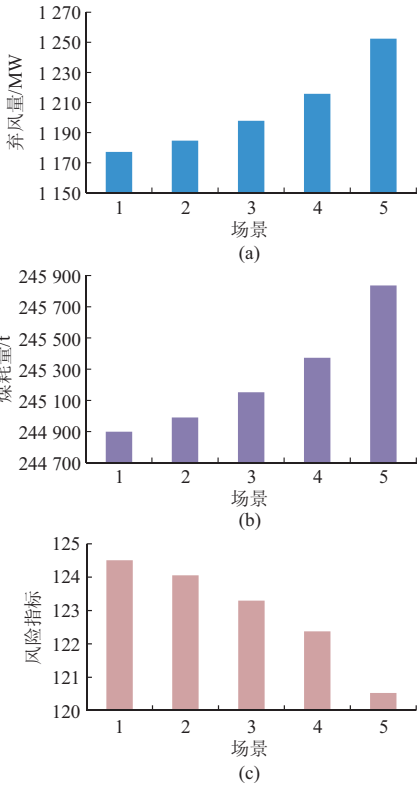


图 4 不同风险水平下的调度结果
Fig.4 Scheduling results under different risk levels

6 结语

本文基于电池储能系统和风机运行风险模型提出了含风储一体化电站的电力系统风险指标,建立了考虑系统火电机组煤耗量、风险和弃风量的优化调度模型,应用多目标的处理方式解决上述 3 个目标的矛盾,在降低风险的同时,提高了系统经济性和

风电利用率。

风储一体化运行模式通过风电站内风储的配合,相比可调度储能模式消纳了更多风电,减少了煤耗成本,但风险略高;风速升高和储能运行年限的增加都会提高系统风险;增加模型中风险比重,提高风电利用率和保护电池的储能策略会减少系统风险。在调度运行中全面考虑了风机和储能故障失效和不可靠性给系统带来的运行风险,其对于系统安全运行的影响不可忽视。

本文对储能实时响应模式及多能源系统的风险研究尚有欠缺。在后续研究中将继续加入可再生能源和储能设备类型,研究风光储一体化的风险调度。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

[1] 袁小明,程时杰,文劲宇.储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J].电力系统自动化,2013,37(1):14-18.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, WEN Jinyu, et al. Prospects analysis of energy storage application in grid integration of large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 14-18.

[2] 中国储能网.青海发布 2017 年度风电开发建设方案通知[EB/OL]. [2017-06-22]. <http://www.escn.com.cn/news/show-433651.html>.

[3] 陆秋瑜,胡伟,闵勇,等.考虑时间相关性的风储系统多模式协调优化策略[J].电力系统自动化,2015,39(2):6-12.DOI:10.7500/AEPS20140922004.
LU Qiuyu, HU Wei, MIN Yong, et al. A multi-pattern coordinated optimization strategy of wind power and energy storage system considering temporal dependence [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39 (2) : 6-12. DOI: 10.7500/AEPS20140922004.

[4] 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 Buhan, ZENG Jie, MAO Chengxiong, et al. Improvement of power quality and stability of wind farms connected to power grid by battery energy storage system[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 54-58.

[5] 严干贵,冯爽,李军徽.风储联合发电系统研究进展[J].储能科学与技术,2014,3(4):297-301.
YAN Gangui, FENG Shuang, LI Junhui. Review on combined wind power generation and energy storage systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2014, 3(4): 297-301.

[6] 郑雪冰.利用储能电池进行削峰填谷的多指标综合评价方法[D].北京:华北电力大学,2015.

[7] 党磊.考虑储能多种模式运行的风储系统联合优化调度[D].北京:华北电力大学,2016.

[8] 李文沅.电力系统风险评估:模型、方法和应用[M].北京:科学出版社,2006:225-227.

[9] HUANG Y, HU W, MIN Y, et al. Risk-constrained coordinative dispatching for battery energy storage systems of

wind farms[C]// IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, March 24-27, 2013, Beijing, China: 6p.

[10] ZHANG Yongxi, LUO Fengji, MENG Ke, et al. Risk constrained battery energy storage planning in active distribution networks[C]// IEEE International Conference on Power System Technology, September 26-October 1, 2016, Wollongong, Australia: 6p.

[11] BAHRAMIRAD S, REDER W, KHODAEI A. Reliability-constrained optimal sizing of energy storage system in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 2056-2062.

[12] 高红均,刘俊勇,魏震波,等.考虑风储一体的多场景两阶段调度决策模型[J].电力自动化设备,2014,34(1):135-140.
GAO Hongjun, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Multi-scenario two-stage dispatch decision-making model for wind farm with integrated energy storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 135-140.

[13] 蒋程,刘文霞,张建华.含电池储能风电场的电力系统风险评估[J].电网技术,2014,38(8):2087-2094.
JIANG Cheng, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua. Risk assessment for power system with wind farm and battery energy storage[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2087-2094.

[14] 文云峰,江宇飞,沈策.多阶段协调的风险调度模型及算法研究[J].中国电机工程学报,2014,34(1):153-160.
WEN Yunfeng, JIANG Yufei, SHEN Ce. Research on the model and algorithm of multistage coordinated risk-based dispatch[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 153-160.

[15] 赵书强,王扬,徐岩,等.基于机会约束目标规划的高风电接入比例下大规模储能与火电协调调度[J].中国电机工程学报, 2016,36(4):969-977.
ZHAO Shuqiang, WANG Yang, XU Yan, et al. Coordinated dispatch of large scale energy storage system and thermal generation in high wind power penetration level system based on chance constrained goal programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 969-977.

[16] 娄素华,杨天蒙,吴耀武,等.含高渗透率风电的电力系统复合储能协调优化运行[J].电力系统自动化,2016,40(7):30-35. DOI:10.7500/AEPS20150906011.
LOU Suhua, YANG Tianmeng, WU Yaowu, et al. Coordinated optimal operation of hybrid energy storage in power system accommodated high penetration of wind power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 30-35. DOI: 10.7500/AEPS20150906011.

[17] 徐国栋,程浩忠,马则良,等.考虑电网调峰能力限制的风储联合系统概率综合效益评价方法[J].电网技术,2015,39(10): 2731-2738.
XU Guodong, CHENG Haozhong, MA Zeliang, et al. A method to evaluate probabilistic comprehensive benefits of joint wind power and storage system considering constraints of peak load regulation capacity[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2731-2738.

[18] 吴雄,王秀丽,李骏,等.风电储能混合系统的联合调度模型及求解[J].中国电机工程学报,2013,33(13):10-17.

- WU Xiong, WANG Xiuli, LI Jun, et al. A joint operation model and solution for hybrid wind energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 10-17.
- [19] 袁铁江,蒋平,孙谊嫒,等.风储一体化电站容量双层优化规划研究[J].高电压技术,2015,41(10):3204-3212.
- YUAN Tiejia, JIANG Ping, SUN Yiqian, et al. Research on bi-level capacity programming optimization for the integration of wind farm energy storage power station[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3204-3212.
- [20] 徐立亮.风储一体化系统的建模与仿真[D].乌鲁木齐:新疆大学,2015.
- [21] 谭兴国,王辉,张黎,等.微电网复合储能多目标优化配置方法及评价指标[J].电力系统自动化,2014,38(8):7-14. DOI: 10.7500/AEPS20130719005.
- TAN Xingguo, WANG Hui, ZHANG Li, et al. Multi-objective optimization of hybrid energy storage and assessment indices in microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 7-14. DOI: 10.7500/AEPS20130719005.
- [22] 蒋程,张建华,刘先正,等.计及运行工况的风电机组停运模型[J].电力系统保护与控制,2013,41(24):112-116.
- JIANG Cheng, ZHANG Jianhua, LIU Xianzheng, et al. Wind turbine outage model based on operation conditions[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 112-116.
- [23] 周玮.含风电场的电力系统动态经济调度问题研究[D].大连:大连理工大学,2010.
- [24] 钟宇峰,黄民翔,羌丁建.电池储能系统可靠性建模及其对配电系统可靠性的影响[J].电力系统保护与控制,2013,41(19):95-102.
- ZHONG Yufeng, HUANG Minxiang, QIANG Dingjian. Reliability modeling of battery energy storage system and its effect on the reliability of distribution system [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 95-102.
- [25] DENSON W. Handbook of 217 plus reliability prediction models [M]. Utica, NY, USA: Reliability Information Analysis Center, 2006.
- [26] 兰汉金.蓄电池失效概率分析[J].船电技术,2007,27(5):321-324.
- LAN Hanjin. Analysis on the invalidation probability of the storage battery[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2007, 27(5): 321-324.
- [27] CAO B, LIU W, WANG R, et al. A generation and load integrated scheduling method considering grid operation risk [C]// 2015 IEEE 3rd International Conference on Computer, Communication, Control and Information Technology (C3IT), 2015: 12p.
- [28] 钟宇峰,黄民翔,叶承晋.基于电池储能系统动态调度的微电网多目标运行优化[J].电力自动化设备,2014,34(6):114-121.
- ZHONG Yufeng, HUANG Minxiang, YE Chengjin. Multi-objective optimization of microgrid operation based on dynamic dispatch of battery energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 114-121.
- [29] OMAR N, MONEM M A, FIROUZ Y, et al. Lithium iron phosphate based battery—assessment of the aging parameters and development of cycle life model[J]. Applied Energy, 2014, 113(1): 1575-1585.

孙 辉(1964—),女,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统分析、新能源控制技术、DFACTS在电力系统中的应用。

刘 鑫(1992—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统优化调度和运行风险。E-mail: 438431623@qq.com

贵 驰(1966—),女,高级工程师,主要研究方向:电力系统经济运行。

(编辑 章黎)

Multi-objective Risk Scheduling Model of Power System Containing Power Station with Integrated Wind Power and Energy Storage

SUN Hui¹, LIU Xin¹, BEN Chi², YU Jianming³, HU Shubo¹, ZHOU Wei¹

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Northeast China Grid Co. Ltd., Shengyang 110180, China;

3. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute) (Beijing), Beijing 100192, China)

Abstract: The integrated operation of wind power and energy storages is the development trend of wind power station. Compared with the energy storage and wind power separately dispatched by the system, the utilization ratio of wind power is improved through the integration of wind farms and energy storages. Based on the operation characteristics of battery energy storage system and the failure mechanism of wind power generators of the integrated station, the loss of load and wind abandoning risk indicators of the integrated operation of wind power and energy storage are built up. A multi-objective optimization dispatch model with the minimum coal consumption of thermal power unit, minimum risk and minimum wind curtailment capacity is proposed. The contradiction in the operation of power system is solved among the risk and coal consumption and wind consumption capacity. The computation example verifies that the model improves the economic efficiency and wind power utilization clearly in the operation of the power system after integration, even though the risk increases a little compared with the traditional unified operation of wind power and energy storage.

Key words: wind power generation; risk; optimal dispatch; battery energy storage; multi-objective