

基于荷电状态动态调整的储能电站容量规划

张 熙¹, 张 峰¹, 巩乃奇², 刘海客³, 梁 军¹, 杨立滨⁴

(1. 山东大学 山东省电动汽车工程实验室, 山东 济南 250061; 2. 山东科技大学 信息与电气工程学院, 山东 青岛 266590;
3. 国网技术学院, 山东 济南 250061; 4. 国网青海省电力公司电力科学研究院, 青海 西宁 810000)

摘要: 储能系统平滑风电功率波动可以有效提高风电输出功率的稳定性, 但昂贵的储能成本却制约着储能系统的整体性能, 由此储能容量优化成为解决储能成本与平抑波动能力相互制约的方式之一。以储能系统荷电状态(SOC)为参量, 提出基于可变功率修正系数的储能系统充放电控制策略, 在储能系统有效平抑风电功率波动的同时, 避免出现过充过放现象, 保证储能系统的运行寿命。以储能系统多种成本之和最小为目标, 构建计及风电场投资、运行成本和储能运行寿命的储能容量优化模型, 并采用粒子群优化算法对模型进行求解。仿真分析结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 储能; 荷电状态; 容量; 成本; 优化; 风电

中图分类号: TM 614; TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.11.004

0 引言

风能作为一种可再生能源正在世界范围内得到广泛的利用^[1]。由于风的随机性、间歇性和不可控性的特点, 其出力会对电网电压的稳定性和电能质量等方面产生影响^[2-3]。面对风能这类可再生能源规模的持续增长, 如何解决其输出功率波动对电网的影响成为当前电网面临的一个重要问题^[4]。在风电场配置一定容量和功率的储能系统, 可以有效地平滑风电功率波动, 提高电力系统稳定性^[5-6]。然而储能系统配置的成本与平抑风功率波动的效果却相互制约, 为此, 如何对储能容量进行优化, 实现经济、有效地平抑风功率波动是目前亟需解决的问题。

近年来, 国内外学者对储能的配置问题进行了相关研究, 取得了诸多研究成果。文献[7]将风电输出的有功功率分解为电网可接受的限值内有功波动功率和给电网带来不利影响的限值外有功波动功率, 通过只对限值外的功率波动进行补偿, 有效减少储能的配置容量; 文献[8-10]则基于蓄电池储能系统的荷电状态 SOC(State Of Charge), 通过相关规则实时调整滤波器的滤波时间常数, 来实现控制 SOC 稳定在正常工作状态的目标; 文献[11]本质上是对平抑目标的适时调整, 其方式是通过实时监测风电功率波动程度与储能系统的 SOC, 相应调整并

网功率的参考值修正充放电功率, 来控制储能系统出现的过充或过放现象; 文献[12]基于风电场输出功率的分布规律, 以风电场平均输出功率水平为期望输出功率, 考虑风电场持续输出小时数的影响, 确定风电场的储能容量; 文献[13]则提出以减小风电机组及储能装置有功输出的标准差作为储能容量优化的评判标准, 并通过混沌粒子群优化(PSO)算法证明了其有效性; 类似地, 文献[14]考虑不同储能容量对平抑风电场输出功率的影响, 并给出了衡量总有功功率波动的指标; 文献[15]则以储能投资成本和风电场运行成本最小化为目标, 利用粒子群优化算法实现储能容量优化的计算。

上述研究对减少风电场并网功率的波动及提升储能系统的优化配置问题具有重要作用, 但在储能容量的优化计算上, 仍存在如下不足: 目前以储能系统的 SOC 为参量的储能系统的研究更多体现在储能控制层面的研究, 而基于 SOC 与经济性的储能系统最优容量规划却鲜有研究; 储能容量优化计算过程中, 或只考虑在较长时间保障风电功率为稳定值为标准来配置容量, 或以风电机组及储能装置输出功率波动标准差为指标进行优化, 或考虑运行成本和投资成本最小化作为优化目标, 均未以储能系统充放电功率不足或过充过放状态对平抑并网功率波动的影响作为储能容量优化计算中的指标。

基于此, 本文以 SOC 作为衡量储能系统运行状态的重要指标, 通过实时监测储能系统 SOC 及其充放电状态, 引入充放电功率修正系数来预先控制储能系统 SOC, 并使其避免运行在过充过放状态; 在此基础上, 引入 SOC 对应的运行成本, 并加入储能系统的置换、维护成本, 构建了以经济性指标为目标函数的储能系统容量优化模型, 该模型实现了顾及调度

收稿日期: 2014-11-12; 修回日期: 2015-07-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307101, 51177091); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目(BS2013NJ011); 青海省光伏发电并网技术重点实验室项目(2014-Z-Y34A)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307101, 51177091), Technology Foundation for Middle-aged and Young Scientist of Shandong Province(BS2013NJ011) and Qinghai Province Key Laboratory of Photovoltaic Grid Connected Power Generation Technology(2014-Z-Y34A)

需求、储能运行寿命和经济性的储能容量优化。利用粒子群优化算法对本文方法进行了求解,经分析对比验证了所提容量优化方法的有效性和合理性。

1 基于电池 SOC 的充放电模型

SOC 是指其剩余容量与其完全充电状态的容量比值,其取值范围为 $[0,1]$,当 $SOC=1$ 时表示电池完全充满,当 $SOC=0$ 时表示电池放电完全^[16]。在储能电站中,通常情况下,充电时取各个电池组中的 SOC 最大值作为整个储能系统的 SOC 值;放电时取各个电池组中的 SOC 最小值作为整个储能系统的 SOC 值。这样可以有效防止单个电池的过充过放现象^[17]。

常规储能容量优化过程中未考虑储能系统的 SOC,其不足在于:第一,由于储能系统频繁出现过充过放现象,或长时间处于不正常的工作 SOC,导致其使用寿命大幅缩短,大幅增加了储能系统的成本,不利于经济性的考虑;第二,储能系统的过充过放使得充放电功率难以控制,会导致注入电网的功率出现剧烈波动,影响电网稳定性。本文引入充放电功率修正系数,通过充放电功率对 SOC 进行直接的实时调整,将 SOC 与并网目标功率值直接联系起来,起到有效平抑并网功率波动与精确调整储能系统 SOC 的作用。

1.1 SOC 分区模型

当风电机组输出功率大于并网功率参考值时,储能系统充电以平抑输出功率波动;当风电机组输出功率小于并网功率参考值时,储能系统放电以弥补输出功率的不足,以此平滑风电机组的输出功率,实现风电并网功率的稳定性。

t 时刻风电场输出功率 $P_w(t)$ 与并网目标功率 $P_{ref}(t)$ 的差值 $\Delta P(t)$ 为:

$$\Delta P(t)=P_w(t)-P_{ref}(t) \tag{1}$$

储能系统处于充电状态时:

$$P_{ESS}(t)=\Delta P(t)\eta_c \tag{2}$$

储能系统处于放电状态时:

$$P_{ESS}(t)=\Delta P(t)/\eta_d \tag{3}$$

其中, $P_{ESS}(t)$ 为 t 时刻储能系统充放电功率; $P_{ESS}(t)>0$ 时储能系统充电, $P_{ESS}(t)<0$ 时储能系统放电; η_c 为储能系统的充电效率,一般取 $0.65\sim 0.85$; η_d 为放电效率,一般取 0.9 。

储能电站充放电功率指令应当考虑当前的 SOC 水平和当前时刻的功率指令大小,即当 SOC 位于正常工作范围内,储能电站的充放电功率保持不变;当 SOC 越限到非正常工作范围时,需要及时调整充放电功率,防止出现过充过放现象。

设定储能系统运行时 SOC 的限制分类及其不同运行区间,其分区模型如图 1 所示,其中, SOC_{max} 和

SOC_{min} 分别为 SOC 的上限和下限, SOC_{H2} 和 SOC_{L2} 分别过充、过放警戒线。 $[SOC_{min},SOC_{L2}]$ 为过放区域, $[SOC_{L2},SOC_{L1}]$ 为预过放区域, $[SOC_{L1},SOC_{H1}]$ 为正常区域, (SOC_{H1},SOC_{H2}) 为预过充区域, $(SOC_{H2},SOC_{max}]$ 为过充区域。本文过放区间中 SOC_{L2} 、 SOC_{L1} 分别取值为 0.1 和 0.2 , SOC_{min} 为 0.05 ;过充区间中 SOC_{H1} 、 SOC_{H2} 分别取值为 0.8 和 0.95 ,且 SOC_{max} 取为 1.0 。

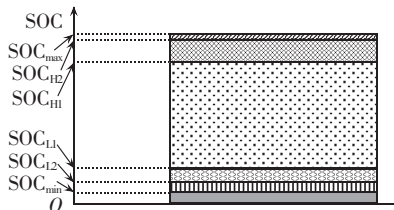


图 1 SOC 分区模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of SOC partition model

1.2 过充过放保护控制

储能系统 SOC 运行区间的变化将引发功率修正系数的对应调整,以达到预先控制储能系统充放电功率的目的,避免其达到过充过放的状态。具体的控制策略如表 1 所示。

表 1 功率修正系数控制规则

Table 1 Control rules of power correction coefficient

SOC 区间	状态	功率修正系数
$(SOC_{H1},SOC_{max}]$	充电	式(4)且 $SOC_{ext}=SOC_{max}$ 、 $SOC_{opp}=SOC_{H1}$
	放电	维持原值
$[SOC_{L1},SOC_{H1}]$	充电	维持原值
	放电	维持原值
$[SOC_{L2},SOC_{L1})$	充电	维持原值
	放电	式(4)且 $SOC_{ext}=SOC_{L2}$ 、 $SOC_{opp}=SOC_{L1}$

分析可知,当储能系统 SOC 偏高,即位于预过充区域时,表示储能趋于饱和。若处在充电状态下($P_{ESS}(t)>0$),需对 $P_{ESS}(t)$ 进行预先控制,通过式(4)调整功率修正系数,修正 $P_{ESS}(t)$ 使其减小,以缓解其 SOC 升高的速度,防止储能系统出现过度充电的状态;若处在放电状态下($P_{ESS}(t)<0$),则维持原值。反之亦然,当储能系统 SOC 偏低,即位于预过放区域时,若处在放电状态($P_{ESS}(t)<0$),通过调整功率修正系数,修正 $P_{ESS}(t)$ 使其减小,以减缓其 SOC 降低的速度,防止储能系统出现深度放电的状态。若处在充电状态下($P_{ESS}(t)>0$),则维持原值。当储能系统 SOC 位于正常区域时,维持修正系数不变,使其正常充放电。

$$\delta(t)=\frac{1}{-lg\left|\frac{SOC_{ext}-SOC(t)}{SOC_{ext}-SOC_{opp}}\right|} \tag{4}$$

其中, $\delta(t)$ 为 t 时刻充放电功率修正系数,当储能系统位于正常区域时取值为 1 ; SOC_{ext} 为对应区间的极大或极小值; SOC_{opp} 为对应区间中与 SOC_{ext} 对应的极小或极大值; $SOC(t)$ 为 t 时刻储能系统的 SOC。本文采用对数壁垒函数,当 SOC 接近 SOC_{max} 或 SOC_{L2} 时,

因对数函数收敛性强,可以更快地降低 $\delta(t)$,更好地起到预先控制充放电功率的作用,有效避免储能系统的 SOC 达到过充或过放状态。

需要说明的是,本文提出的功率修正系数控制方法在储能系统 SOC 达到 SOC_{H2} 时, $\delta(t)$ 最小值不为 0,其目的在于保证储能容量的充分利用,仍可继续充电;而 SOC 达到 SOC_{L2} 时已将 $\delta(t)$ 修正为 0,这样可以严格控制储能系统的最低容量,彻底避免储能系统运行在过放区域,减少储能系统的寿命损耗。

由此,可以得到调整后的储能系统充放电功率。储能系统处于充电状态时:

$$P'_{\text{ESS}}(t) = \delta(t) \Delta P(t) \eta_c \quad (5)$$

储能系统处于放电状态时:

$$P'_{\text{ESS}}(t) = \delta(t) \Delta P(t) / \eta_d \quad (6)$$

其中, $P'_{\text{ESS}}(t)$ 为 t 时刻经过功率修正系数调整后的储能系统充放电功率,当 $P'_{\text{ESS}}(t) > 0$ 时储能系统充电, $P'_{\text{ESS}}(t) < 0$ 时储能系统放电。

2 储能容量规划

风电场储能容量优化的目标在于保证减少风电场输出功率波动的前提下,调节投入成本与运行成本之间的相互制约关系,在保证平滑输出功率的前提下,以最低储能的投入成本和运行成本实现风电场储能系统的运行效益最优化。

2.1 目标函数

风电场配置不同的储能容量得到的风电场功率波动平抑效果不同,在保证满足风电场输出功率波动要求的前提下,针对储能容量投入成本与运行成本的制约关系,以储能的综合效益达到最优为目标。其中,储能系统的投入成本 C_C 包括储能系统的维护成本 C_M 、储能系统各储能单元的置换成本(仅当储能单元的使用寿命小于工程年限时考虑) C_R 和储能系统的基本投资成本 C_{B0} 。

$$C_C = C_M + C_R + C_B \quad (7)$$

$$C_B = N_{\text{bess}} \rho_1 W_0 + N_{\text{bess}} \rho_2 W_0 m \quad (8)$$

其中, N_{bess} 为储能系统中蓄电池的数量; ρ_1 为储能单位容量安装价格; W_0 为风电场优化储能容量; ρ_2 为储能单位容量价格; m 为折旧系数,其定义^[18]如式(9)所示。

$$m = \frac{r(1+r)^{L_m}}{(1+r)^{L_m} - 1} \quad (9)$$

其中, r 为折旧率; L_m 为工程年限。

运行成本包含因功率修正系数调整引起的风电场弃风损失成本、平滑功率短缺损失成本以及储能系统越限运行的折算损失成本,三者均因储能容量的变化而变化。

因风电场输出功率具有年度周期性,以年度风

电场输出功率作为储能容量优化的研究对象^[19],其风电场弃风损失能量、平滑功率短缺损失能量和储能系统越限运行的折算能量分别如式(10)—(12)所示。

$$L_{\text{LT}} = N_y \sum_{i=1}^g \sum_{t=p}^q \left(\frac{1-\delta(t)}{\eta_c} \cdot \Delta P(t) \cdot \Delta t \right) \quad (10)$$

$$L_{\text{ST}} = N_y \sum_{i=1}^h \sum_{t=u}^v [(1-\delta(t)) \cdot \eta_d \cdot \Delta P(t) \cdot \Delta t] \quad (11)$$

$$L_{\text{LE}} = N_y \sum_{i=1}^k \sum_{t=x}^y [(\text{SOC}(t) - \text{SOC}_{\text{H2}}) W_0] + N_y \sum_{i=1}^l \sum_{t=z}^a [(\text{SOC}(t) - \text{SOC}_{\text{L2}}) W_0] \quad (12)$$

其中, N_y 为研究对象的时间年度; g, h 分别为 N_y 年度中充、放电过程持续 $\delta < 1$ 调整运行区间的总次数; p, q 分别为 g 次区间的各区间初始和结束时间; u, v 分别为 h 区间的各区间初始和结束时间; k 为 N_y 年度中储能系统运行状态位于超出最大 SOC 的总次数; l 为 N_y 年度中储能系统运行状态位于低于最小 SOC 的总次数; x, y 分别为 k 次区间的各区间初始和结束时间; z, a 分别为 l 次区间的各区间初始和结束时间。式(12)中,储能系统越限运行的折算损失成本包含 2 个部分,分别为当储能系统运行在过高 SOC 和过低 SOC 时,储能系统未处于合理运行状态影响自身寿命周期的折算成本。

风电场储能容量优化的目标为:

$$\min C = K_L \rho_L L_{\text{LT}} + K_S \rho_S L_{\text{ST}} + K_E \rho_E L_{\text{LE}} + C_C \quad (13)$$

其中, ρ_L, ρ_S, ρ_E 分别为风电场弃风损失能量、平滑功率短缺损失能量以及储能系统越限运行的折算能量的对应单价; $\rho_L L_{\text{LT}}$ 为风电场弃风能量成本; $\rho_S L_{\text{ST}}$ 为风电场平滑功率短缺损失能量成本; $\rho_E L_{\text{LE}}$ 为储能系统越限运行的折算损失能量成本; K_L, K_S 和 K_E 为运行成本的惩罚系数; C_C 为储能系统的投入成本。

2.2 约束条件

充放电功率约束:

$$-P_D \eta_d \leq P_W(t) - P_{\text{nd}}(t) \leq P_C \quad (14)$$

其中, P_D, P_C 分别为储能系统的极限充、放电功率,将放电看作负充电过程,其大小以其绝对值为准。

约束条件包括风电场输出功率波动水平约束:

$$P\{|\Delta P_d(t)| \leq \Delta P_{\text{dmax}}\} \geq \Lambda \quad (15)$$

其中, $P\{\cdot\}$ 为概率分布函数; $\Delta P_d(t)$ 为风电场输出功率经储能系统平抑后的波动值; ΔP_{dmax} 为波动值的最大允许范围上限; Λ 为对应的可信度水平。

3 求解方法

本文基于粒子群优化算法^[20],求解方法具体如下。

步骤 1: 选定研究对象时间截面窗口长度 N_y 及其运行数据 $P(t)$ 。

步骤 2: 基于最佳功率输出模型确定期望输出目标值 P_C , 并给定初始 SOC 值。

步骤 3:设置粒子群维数 D 、最大迭代次数 $M_{\max}$ 、收敛精度 C_{σ} ,同时初始化粒子群位置 X_{id} 和速度 V_{id} 。

步骤 4:根据本文充放电策略,结合式 (10)—(15) 计算各粒子的适应度值 p_{id} ,并将其自身粒子极值 p_i 及全局例子极值 p_g 进行比较,若适应度值较小,则更新 p_i 及 p_g ,否则更新粒子速度 V_{id} 及位置 X_{id} 。

步骤 5:计算 $\Delta\sigma^2$,判断是否满足收敛条件,搜索收敛条件如式 (16) 所示。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta\sigma^2 = C_{\sigma}$$

(16)

其中, $\Delta\sigma^2$ 为粒子群的群体或全局适应度方差的变化量; C_{σ} 为接近于零的定常数。若满足收敛条件,则获取最佳储能容量 W_0 ; 否则,重新释放粒子组建新的种群,并重复步骤 4。

4 算例分析

为了验证本文方法的有效性,基于某风电场实际运行数据计算储能最优容量。该风电场装机容量为 90 MW,选取 2013 年风电功率数据,采集时间间隔为 5 min,平抑目标值如图 2 所示。同时,选取最优容量 W_0 、平抑功率偏移量 χ 、SOC 极值越限次数 N 、SOC 过程曲线等指标衡量本文方法有效性,其中平抑功率偏移量 χ 定义如下^[21]:

$$\chi = \sum_{t=t_{ini}}^{t_{end}} (P_d(t) - P_{ref}(t))^2$$

(17)

其中, $P_d(t)$ 为平抑后的风功率值; t_{ini} 、 t_{end} 分别为所选风功率数据时间区间的始、末时刻。

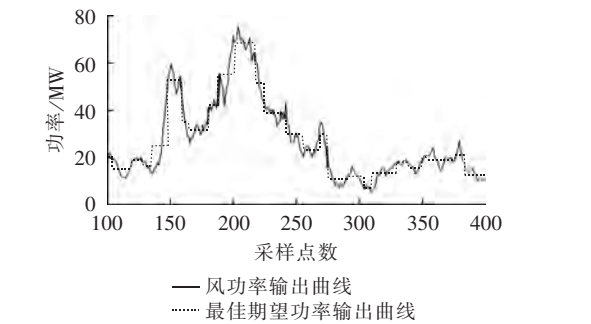


图 2 选定时间截面期望输出
Fig.2 Expected power output of selected period

依据文中充放电功率调整策略及储能容量优化模型,得到平抑波动输出曲线如图 3 所示,计算结果如表 2 所示,并与文献[15]所提方法进行了对比分析。

分析可得,本文方法有效实现了储能容量的优化,相比常规方法容量需求有所降低;平抑功率偏移量方面,本文方法与常规方法相近,略有增加,其原因是功率修正系数调整策略提升了弃风或平抑不足的概率;越极限值运行方面,本文大幅减少 N 的数值,其降幅达 96.2%,效果明显。考察储能电站最

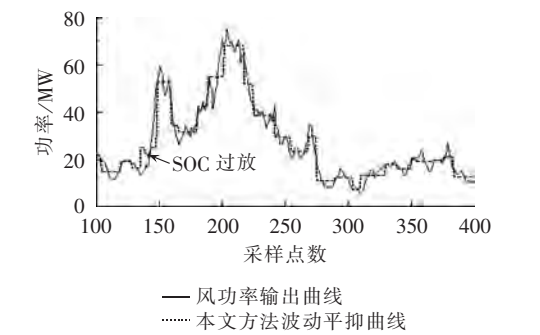


图 3 选定时间截面平抑效果示意图
Fig.3 Achieved power output of selected period

表 2 计算结果

Table 2 Calculative results

方法	$W_0/(MW \cdot h)$	χ/MW^2	N
本文方法	11.467	1.130×10^5	17
常规方法	15.721	1.096×10^5	449

优容量获取过程中 SOC 的变化状况,如图 4 所示。可以看出,本文方法中 SOC 在该区段未越极限值运行,有效保障了 ESS 的使用寿命。

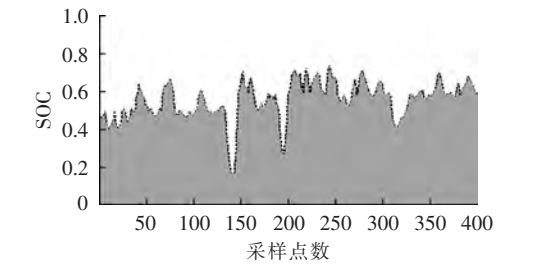


图 4 SOC 曲线示意图
Fig.4 Schematic diagram of SOC curve

综上可得,本文容量优化计算模型综合考虑了储能电站配置及运行过程中的总体经济性,有利于与现场的有效结合。上述理论研究为储能容量的最优化提供了理论前提和保障。同时,实际数据算例分析验证了上述结论。

5 结语

本文以 SOC 作为储能系统运行状态重要指标,通过改变充放电功率修正系数建了抑制过度充放的充放电模型,实现了 SOC 在储能容量配置过程中的调整策略。同时该控制策略在储能容量配置后,可借鉴到相应的实际风电场-储能联合运行系统中,构成实际风电场储能控制策略;在此基础上,引入 SOC 对应的运行成本,构建了以经济性指标为目标函数的储能系统容量优化模型,该模型实现了顾及调度需求、储能运行寿命和经济性的储能容量最优化。

参考文献:

[1] LUICK P J, DELARUE E D, HAESELEER W D D. Effect of the generation mix on wind power introduction[J]. IET Renewable

- Power Generation, 2009, 3(3): 267-278.
- [2] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
 - [3] BIALASIEWICZ J T, MULJADI E. The wind farm aggregation impact on power quality[C]//Proceedings of the 32nd Annual Conference of IEEE Industry Electronic Society. Paris, France: [s.n.], 2006: 4195-4200.
 - [4] 程时杰, 文劲宇, 孙海顺. 储能技术及其在现代电力系统中的应用[J]. 电气应用, 2005, 24(4): 1-6.
CHENG Shijie, WEN Jinyu, SUN Haishun. Application of power energy storage techniques in the modern power system [J]. Electrotechnical Application, 2005, 24(4): 1-6.
 - [5] PAATERO J V, LUND P D. Effect of energy storage on variations in wind power[J]. Wind Energy, 2005(8): 421-441.
 - [6] TELEKE S, BARAN M E, HUANG A Q, et al. Control strategies for battery energy for wind farm dispatching[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2009, 24(3): 725-732.
 - [7] 赵瑜, 周玮, 于芑, 等. 风电有功波动功率调节控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 85-91.
ZHAO Yu, ZHOU Wei, YU Peng, et al. Study on regulation and control of active wind power fluctuations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 85-91.
 - [8] 张野, 郭力, 贾宏杰, 等. 基于电池荷电状态和可变滤波时间常数的储能控制方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 34-38.
ZHANG Ye, GUO Li, JIA Hongjie, et al. An energy storage control method based on state of charge and variable filter time constant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 34-38.
 - [9] 张坤, 吴建东, 毛承雄, 等. 基于模糊算法的风电储能系统的优化控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 235-241.
ZHANG Kun, WU Jiandong, MAO Chengxiong, et al. Optimal control of energy storage system for wind power generation based on fuzzy algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 235-241.
 - [10] 谢俊文, 陆继明, 毛承雄, 等. 基于变平滑时间常数的电池储能系统优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 96-102.
XIE Junwen, LU Jiming, MAO Chengxiong, et al. Optimal control of battery energy storage system based on variable smoothing time constant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 96-102.
 - [11] 丁明, 吴建锋, 朱承志, 等. 具备荷电状态调节功能的储能系统实时平滑控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 22-29.
DING Ming, WU Jianfeng, ZHU Chengzhi, et al. A real-time smoothing control strategy with SOC adjustment function of storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 22-29.
 - [12] 韩涛, 卢继平, 乔梁, 等. 大型并网风电场储能容量优化方案[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 169-173.
HAN Tao, LU Jiping, QIAO Liang, et al. Optimized scheme of energy storage capacity for grid-connected large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 169-173.
 - [13] 文艺, 张步涵, 毛承雄, 等. 风电场储能系统的功率和容量优化配置[J]. 湖北工业大学学报, 2012, 27(1): 18-21.
WEN Yi, ZHANG Buhan, MAO Chengxiong, et al. The power and capacity's optimized allocation of energy storage device in wind farm [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2012, 27(1): 18-21.
 - [14] MENNITI D, PINNARELLI A, SORRENTION N, et al. A method to improve microgrid reliability by optimal sizing PV/wind plants and storage systems[C]//Proceedings of the 20th International Conference on Electricity Distribution. Prague, Czech: [s.n.], 2009: 1-4.
 - [15] 冯江霞, 梁军, 张峰, 等. 考虑调度计划和运行经济性的风电场储能容量优化计算[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 90-95.
FENG Jiangxia, LIANG Jun, ZHANG Feng, et al. An optimization calculation method of wind farm energy storage capacity [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 90-95.
 - [16] 张卫东, 刘祖明, 申兰先. 利用储能平抑波动的光伏柔性并网研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 106-111.
ZHANG Weidong, LIU Zuming, SHEN Lanxian. Flexible grid-connection of photovoltaic power generation system with energy storage system for fluctuation smoothing [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 106-111.
 - [17] 施啸寒, 王少荣. 蓄电池-超导磁体储能系统平抑间歇性电源出力波动的研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 53-58.
SHI Xiaohan, WANG Shaorong. Power output fluctuation suppression by hybrid energy storage system for intermittent source [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 53-58.
 - [18] 丁明, 张颖媛, 茆美琴. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
 - [19] 南晓强, 李群湛. 考虑风功率预测误差分布的储能功率与容量配置法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 117-122.
NAN Xiaoqiang, LI Qunzhan. Energy storage power and capacity allocation based on wind power forecasting error distribution [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 117-122.
 - [20] 李佳, 刘天琪, 李兴源. 改进粒子群-禁忌搜索算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 117-122.
LI Jia, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Application of improved particle swarm-tabu search algorithm in multi-objective reactive power optimization [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 117-122.
 - [21] 李碧辉, 申洪, 汤涌, 等. 风光储联合发电系统储能容量对有功功率的影响及评价指标[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 123-128.
LI Bihui, SHEN Hong, TANG Yong, et al. Impacts of energy storage capacity configuration of HPWS to active power characteristics and its relevant indices [J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 123-128.

作者简介:



张 熙

张 熙(1982—),男,山东济南人,博士研究生,研究方向为电动汽车与新能源协同调控理论;

张 峰(1983—),男,山东莱芜人,副教授,博士,通信作者,研究方向为新能源并网的调度与控制(E-mail: zf-365@163.com);

张 熙 巩乃奇(1989—),男,山东济南人,硕士研究生,研究方向为储能技术及电动汽车充换电技术。

并网 AWS 波浪发电场等效建模

秦 川^{1,2},管维亚^{1,2},鞠 平^{1,2},吴 峰^{1,2}

(1. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100;

2. 河海大学 可再生能源发电技术教育部工程研究中心,江苏 南京 210098)

摘要: 提出了阿基米德波浪摆(AWS)发电场的等效建模方法,重点研究波浪力输入等效。提出基于波浪最大能量捕获控制策略下 AWS 波浪力输入和输出有功功率之间的稳态关系,由于等效前后的发电场输出有功功率应该相等,在规则波浪和不规则波浪 2 种情况下,反推获得等效模型的波浪力输入,同时计及功率补偿。搭建了波浪能发电场详细模型,并将其等效为一台 AWS 波浪能发电单元。仿真结果表明,单机等效模型的稳态有功输出和故障时动态响应均与详细模型高度吻合。

关键词: 阿基米德波浪摆; 波浪最大能量捕获控制; 等效建模; 波浪力等效; 发电; 可再生能源

中图分类号: TM 619

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.11.005

0 引言

波浪能是一种清洁的可再生能源。调查研究表明,全球可利用的波浪能达到 2×10^9 kW,相当于目前全世界用电负荷的 2 倍^[1]。大规模开发利用波浪能对缓解能源危机和环境污染问题具有重要意义。近年来,各国开发出了多种波浪能发电装置,如振荡水柱(OWC)波浪发电装置、阿基米德波浪摆(AWS)、Pelamis、Wave Dragon、鸭式及鹰式波浪能发电装置等^[2-4],其中部分已经进入了商业化试运营。可以预见,在不远的将来,随着波浪能发电技术日

益成熟,将会有越来越多的波浪能发电系统接入电网运行^[2]。

AWS 是第 1 种采用直接驱动式的波浪发电系统^[5-7],其利用水的浮力或重力直接驱动直线永磁发电机(LPMG)发电,具有发电效率高、系统结构简单等特点。大规模 AWS 波浪能发电场接入电网,必然对电网的安全稳定产生重要的影响。在大规模波浪能发电场并网系统的仿真分析中,如果对每台 AWS 进行详细建模将极大地增加仿真的复杂度,导致计算时间长、资源利用率低^[8]。因此,构建能反映大规模波浪发电场整体动态特性的等效模型十分必要。

大规模波浪发电场等效建模作为一个较为新颖的课题,目前直接与其相关的国内外文献很少。但已有不少学者对风电场的等效建模有所研究^[8-10]。在对波浪发电场进行等效建模时,等效模型结构和等效参数的确定可以参考风电场等效建模的相关

收稿日期:2014-12-14;修回日期:2015-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51137002,51190102,51377047);国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB228204)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51137002,51190102,51377047) and the National Key Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228204)

BESS capacity planning based on dynamic SOC adjustment

ZHANG Xi¹,ZHANG Feng¹,GONG Naiqi²,LIU Haike³,LIANG Jun¹,YANG Libin⁴

(1. Electric Vehicle Engineering Laboratory of Shandong Province,Shandong University, Ji'nan 250061,China;

2. College of Information & Electrical Engineering,Shandong University of Science and Technology,

Qingdao 266590,China;3. State Grid of China Technology College, Ji'nan 250061,China;

4. State Grid Qinghai Electric Power Research Institute,Xining 810000,China)

Abstract: Though the BESS(Battery Energy Storage System) may smooth the wind power fluctuation to effectively improve the stability of wind power output,its expensive cost restricts its overall performance,for which,the energy storage capacity optimization is a way to achieve the balance between its cost and performance. With the SOC(State Of Charge) of BESS as an indicator,a strategy of charge/discharge control based on the variable power correction coefficient is proposed,which effectively smoothes the wind power fluctuation while avoids the phenomenon of over-charge or over-discharge to ensure its lifetime. With the minimum total cost of BESS as its objective,an energy storage capacity optimization model considering the wind farm investment,operational cost and BESS lifetime is built and solved by PSO(Particle Swarm Optimization) algorithm. The simulative analysis verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: energy storage; state of charge; capacity; costs; optimization; wind power