

计及储能寿命的风储电站分层优化控制策略^{*}

王春生¹, 潘 霄¹, 刘 岩¹, 邓鑫阳¹, 马少华², 颜 宁²

(1. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院, 辽宁 沈阳 110016;

2. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘 要: 为了有效地平抑风电场的功率波动, 提高风电场的并网特性, 增强风电场并网运行的经济性和可靠性, 提出了一种计及储能寿命的风储电站分层优化控制策略。首先, 从经济学角度分析储能系统的充放电特性, 考虑不同控制方式对储能系统寿命的影响; 其次, 采用分层-分区控制方式对风储电站进行协调控制, 上层根据电网调度需求, 考虑分时电价政策对集中式储能和整个风电场级进行协调功率控制, 下层考虑区域内分布式储能和多台风电机组间的协调功率控制; 最后, 采用改进遗传算法对分层优化控制模型求解。结果表明: 所提出的基于储能寿命损耗的风储电站优化控制方法实现了风储电站中储能系统及风机出力的合理分配, 在延长储能寿命的同时提高了电网对风电的消纳能力, 使得整个风电场运行经济性显著提高。

关键词: 风电场; 电池储能; 全寿命周期成本; 分层控制

中图分类号: TM 762 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)10-0019-05

Hierarchical Optimization Control Strategy for Wind Power and Battery Energy Storage Combined System with Battery Life Model^{*}

WANG Chunsheng¹, PAN Xiao¹, LIU Yan¹, DENG Xinyang¹, MA Shaohua², YAN Ning²

(1. State Grid Liaoning Electric Power Company Limited Economic Research Institute, Shenyang 110016, China;

2. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: In order to effectively stabilize the power fluctuations of the wind farm, improve the grid connection characteristics of the wind farm, and increase the economics and reliability of the wind farm to achieve grid-connected operation, a hierarchical optimization control strategy for wind storage stations that took into account the energy storage life was proposed. Firstly, from the perspective of economics, the charge and discharge characteristics of the energy storage system were analyzed, and the influence of different control methods on the life of the energy storage system was considered. Secondly, the stratifying and zoning control method was used to coordinate the wind power storage station, in which the upper layer performed coordinated power control on centralized energy storage and the entire wind farm level according to grid dispatching demand and time-sharing electricity price policy, and the lower layer considered distributed energy storage in the area and coordinated power control between multiple wind turbines. Finally, the improved genetic algorithm was used to solve the hierarchical optimization control model. The results showed that the hierarchical optimization control method realized the reasonable distribution of the energy storage system and the output of the wind turbine in the wind power storage station, the energy storage life was extended, the grid's ability to absorb wind power was enhanced, and the economic efficiency of the entire wind farm was significantly improved.

Key words: wind farm; battery energy storage; full life cycle cost; hierarchical control

^{*} 基金项目: 国家电网公司科技项目“清洁能源电网规划关键技术研究”(LNDL2018YF02)

作者简介: 王春生(1969—), 男, 高级工程师, 研究方向为风功率预测与电力系统规划。

潘 霄(1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为储能调控。

刘 岩(1979—), 男, 高级工程师, 研究方向为风电机组控制。

0 引言

分布式能源并网规模的不断扩大对电网的安全稳定带来了重大的挑战。以风电场为例,其为配电网提供无功、电压支撑,调频调压,有效地延缓电网升级等。由于风速存在着随机性和波动性,限制了风能利用率,因此在风电场中需要并入大规模储能系统,有效地减少大规模风电并网引起的运行风险^[1-2]。

风电场中应用储能系统实现削峰填谷、改善电能质量、有效抑制风功率波动的相关研究已相对成熟^[3-5]。文献[6]提出根据风功率预测误差,采用滚动优化调控的方式对储能系统进行动态控制,有效地实现了风功率波动的平抑,但提出的2套储能系统协调交换的控制方法,实质上未能提高电池储能系统的寿命。文献[7-8]提出将超级电容及电化学储能电池组成的混合储能系统应用于风电场及微电网中,主要采用低通/高通、直流母线电压控制储能系统的方式,通过调节充放电次数延长储能系统的寿命。以上研究均未考虑储能设备在运行过程中由于自身寿命损伤对储能经济性造成的影响。

风电场或场群根据电网调度、消纳能力^[9]、传输特性等要求进行有功、无功及电压控制,国内外相关文献采用分层调控方式。文献[10]提出风电场群、风电场、机组三层协调控制方法,通过对双馈风电机组的无功调节有效地提高了整群运行的稳定性。储能系统应用到风电场进行分层调控研究较少,文献[11]提出了基于混合储能的风电场分层调控,但其调控的对象为储能系统,风电场只是研究背景,未考虑风电场及储能系统联合协调分层控制。

本文在以上研究的基础上,在对风储电站进行功率调控的过程中引入储能设备运行寿命损耗函数,采用分层-分区控制方式,充分考虑电网调度需求及分时电价政策对整个风电场出力的影响,采用改进的遗传算法进行多目标优化求解。最后以辽宁某实际运行并网型风电场为例验证所提控制方法的有效性和经济性。

1 风储电站控制单元模型

本文采用风储电站分层-分区控制方法对风

电机组、分布式储能、集中式储能、风电场进行分层调控,风电场快速响应上层调度中心调度指令,通过分解调度指令并逐层响应的方式,有效地减少储能机组寿命损耗,同时提高了风储电站调度的准确度。风储电站并网示意图如图1所示。

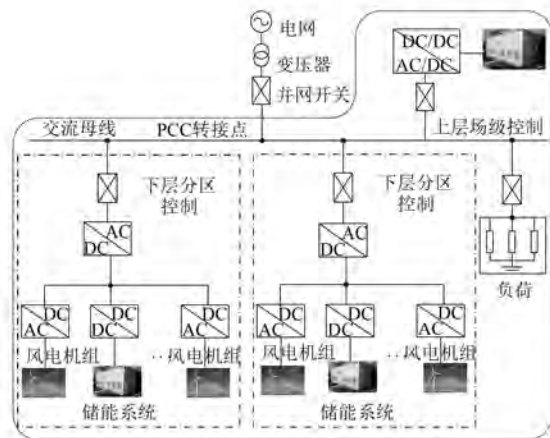


图1 风储电站并网示意图

由图1可以看出,风储电站分层控制主要包括上层场级控制和下层分区控制。前者主要协调风电场并网后集中式储能、负荷、区域风储系统之间功率分配;后者主要考虑分时电价政策协调风电机组与储能之间调控。

1.1 风电机组解耦控制

以双馈风力发电系统为例,采用解耦的方式对发电机输出的有功功率及无功功率进行控制,其等效的数学模型如图2所示。

$$\begin{cases} \dot{U}_s = \dot{E}_m - (R_s + jX_{gs})\dot{I}_s \\ \dot{E}_m = \dot{I}_m \cdot jX_m \\ \dot{I}_r = \dot{I}_s + \dot{I}_m \\ \dot{U}_r = \dot{E}_m + \left(\frac{R_r}{s} + jX_{lr}\right)\dot{I}_r \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_s, R_r ——双馈风机定子、转子电阻;

$\dot{E}_m, jX_m, X_m$ ——电动势、励磁感抗、电抗;

$\dot{U}_s, \dot{I}_s, X_{gs}, X_s$ ——定子电压、电流、漏抗及

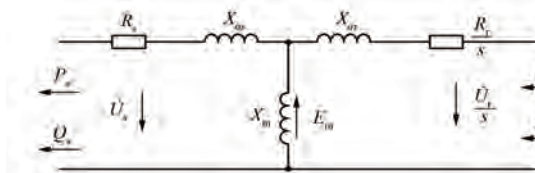


图2 双馈式风电机组的等效电路

电抗;

$\dot{U}_r$ 、 $\dot{I}_r$ 、 $X_{\sigma r}$ 、 X_r ——转子电压、电流、漏抗及电抗;

s ——转差率。

对双馈风力发电机的电流、电压进行等效得

$$\begin{cases} \dot{I}_s = I_{sP} + jI_{sQ} \\ \dot{U}_s = U_s + j0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_{sP} 、 I_{sQ} ——定子电流的有功及无功分量值;

U_s ——定子电压有效值。

根据计算,定子的有功、无功功率输出为

$$\begin{cases} P_s = 3I_{sP}U_s \\ Q_s = -3I_{sQ}U_s \end{cases} \quad (3)$$

$$\left(P_s + \frac{3U_s^2 R_s}{X_s^2 + R_s^2}\right)^2 + \left(Q_s + \frac{3U_s^2 X_s}{X_s^2 + R_s^2}\right)^2 = \frac{9I_r^2 U_s^2 X_m^2}{X_s^2 + R_s^2} \quad (4)$$

当不考虑定子侧电阻作用时,简化风力发电机组有功、无功功率输出关系为

$$P_s^2 + \left(Q_s + \frac{3U_s^2}{X_s^2}\right)^2 = \frac{9I_r^2 U_s^2 X_m^2}{X_s^2} \quad (5)$$

1.2 储能系统控制方式

为了快速平抑风功率波动、快速跟踪电网调度运行中风电场发电计划偏差,采用分布式储能与集中式储能联合调度方式,在保证储能经济运行的同时提高调度的准确性。储能系统的等效模型如图3所示。

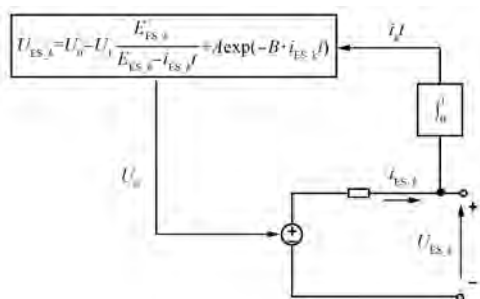


图3 储能系统的等效模型

储能系统的电压与容量关系为

$$U_{ES,k} = U_0 - U_1 \frac{E_{ES,k}}{E_{ES,k} - \int i_{ES,k} dt} + A e^{-B \int i_{ES,k} dt} \quad (6)$$

式中: U_0 ——储能系统电压初始值;

U_1 ——储能系统电压的线性分量;

$E_{ES,k}$ ——储能系统 k 容量;

$i_{ES,k}$ ——充放电电流;

B ——指数对应系数;

t ——储能系统连续充放电时间。

电池组剩余电量

$$SOC = \left(1 - \frac{\int i_{ES,k} dt}{3600 E_{ES,k}}\right) \times 100\% \quad (7)$$

2 风储电站分层-分区控制方式

将分层控制思想应用到风储电站的调控中,下层分区控制时以储能系统寿命损耗及区域内网络损耗最小为优化目标,有效提高各个区域的可调度性;上层场级控制以并网功率偏差率最小为优化目标,实现分层储能与集中储能协调配合、风储电站经济优化运行。

2.1 下层——分区控制方法

在风储电站内考虑单台风电机组与分布式储能系统规划时,将储能系统定容选址在多台风电机组构成的区域内,在优化运行时优先考虑储能系统寿命损耗及网络损耗对区域调控的影响。

2.1.1 网络损耗

图1中,区域 x 内 n 台风机并入储能系统后,各个区域并网点输出的有功功率 $P_{b,x}$ 及无功功率 $Q_{b,x}$ 为

$$\begin{cases} P_{b,x} = P_{w,n} + P_{ES,k} - P_{M,x} \\ Q_{b,x} = Q_{w,n} + Q_{ES,k} - Q_{M,x} = \\ \pm \tan(\arccos^{-1} \phi_x) P_{w,x} \pm \\ \tan(\arccos^{-1} \phi_x) P_{ES,k} - Q_{M,x} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{w,n}$ 、 $Q_{w,n}$ ——区域 x 内 n 台风电机组功率输出;

$P_{w,n}$ 、 $Q_{w,n}$ 、 $Q_{M,x}$ ——区域 x 负荷输出的有功、无功功率;

ϕ_x ——区域 x 接入点相位的偏差值;

$P_{ES,k}$ 、 $Q_{ES,k}$ ——区域 x 储能系统输出功率值。

考虑区域级网络损耗的优化目标为

$$f_4 = \min \sum_{t=1}^{24} \sqrt{P_{b,x,t}^2 + Q_{b,x,t}^2} \quad (9)$$

将式(8)代入,求取区域内网损的最小值。

2.1.2 寿命损耗

储能系统寿命为其总寿命损耗的倒数。由于

放电深度的不同,每次循环充放电储能系统寿命损耗值不同。在考虑储能系统寿命损耗时,需要考虑蓄电池放电深度、过放现象等所对应的寿命损耗成本。

(1) 过放现象。当 t 时刻,单区域 n 风机输出功率不满足负荷需求时,利用储能系统满足负荷需求。若此时储能系统同样不满足需求时,会出现过放现象,具体如式(10)所示:

$$\begin{cases} P_{L,x}(t) - P_{w,n}(t) \geq P_{ES,k,max} \\ \int_{t=(i-1)\Delta t}^{t=i\Delta t} [P_{L,x}(t) - P_{w,n}(t)] dt \geq E_{ES,k}(i-1) - E_{ES,k,min} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{L,x}$ ——区域 x 内负荷需求量;

$P_{ES,k,max}$ 、 $P_{ES,k,min}$ ——储能系统输出功率上下限;

Δt ——储能系统充放电时间间隔。

为了有效地提高储能系统的运行寿命,尽量减少过放现象的产生,以需求偏差最小为优化目标,具体的表达式为

$$f_2 = \min \Delta E_{ES,k}(t) = \min \int_{t=(i-1)\Delta t}^{t=i\Delta t} [P_{L,x}(t) - P_w(t)] dt - [E_{ES,k}(t-1) - E_{ES,k,min}] \quad (11)$$

(2) 过充现象。当 t 时刻,单区域 n 风机输出功率满足负荷需求时,满足电网调度需求的同时将剩余能量存储到储能系统中。若此时储能系统容量能完全消纳风电时,会出现过充现象,具体如式(12)所示:

$$\begin{cases} P_{L,x}(t) - P_{w,n}(t) \geq P_{ES,k,max} \\ P_{ES,k,max} \cdot \Delta t \geq E_{ES,k}(i-1) - E_{ES,k,min} \end{cases} \quad (12)$$

为了有效地提高储能系统的运行寿命,尽量减少过充现象的产生,以需求偏差最小为优化目标,具体的表达式为

$$f_3 = \min \Delta E_{ES,k}(t) = \min \int_{t=(i-1)\Delta t}^{t=i\Delta t} [P_{w,n}(t) - P_{L,x}(t)] dt - [E_{ES,k,max} - E_{ES,k}(t-1)] \quad (13)$$

2.1.3 考虑分时电价政策储能调控

电网根据不同时段负荷情况,将 24 h 划分为不同时段,如尖峰时、峰时、平时、谷时等,风储电站储能系统一般采用峰时放电、谷时充电,通过分时电价政策有效实现功率时间及空间的转移。储能系统一天内容量变化如式(14)所示:

$$h = \sum_{i,j=1}^{24} (m_i^- P_{ES,k,i}^+ - \eta m_j^+ P_{ES,k,j}^-) \cdot \Delta t \quad (14)$$

式中: $P_{ES,k,i}^+$ ——第 i 小时段储能装置放电功率;

$P_{ES,k,j}^-$ ——第 j 小时段储能装置充电功率;

m_i^+ ——第 i 小时段(用电高峰期)电价;

m_j^- ——第 j 小时段(用电低谷期)电价。

2.2 上层——场级控制方法

风电场并入储能系统后,整个风储电站并网运行时以总网络损耗和并网功率偏差率最小为优化目标。

计算风电场并网后整个网络的有功功率损耗 $P_{W,\mathcal{L}}$ 和无功网损 $Q_{W,\mathcal{L}}$ 分别为

$$\begin{cases} P_{W,\mathcal{L}} = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{x=1}^{X+1} \left\{ \alpha_{xy} (P_{L,x} + P_{ES,k} - P_{w,n}) P_{by} + \alpha_{xy} \left[\pm \tan(\arccos^{-1} \phi_x) P_{L,x} \pm \tan(\arccos^{-1} \phi_x) P_{ES,k} - Q_{w,n} \right] Q_{by} + \beta_{xy} \left[\pm \tan(\arccos^{-1} \phi_x) P_{L,x} \pm \tan(\arccos^{-1} \phi_x) P_{ES,k} - Q_{w,n} \right] P_{by} - \beta_{xy} (P_{L,x} + P_{ES,k} - P_{w,n}) Q_{by} \right\} \\ Q_{W,\mathcal{L}} = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^X \left\{ \alpha_{xy} (P_{L,x} + P_{ES,k} - P_{w,n}) P_{by} + \gamma_{xy} \left[\pm \tan(\arccos^{-1} \phi_x) P_{L,x} \pm \tan(\arccos^{-1} \phi_x) P_{ES,k} - Q_{Mx} \right] Q_{by} + \xi_{xy} \left[\pm \tan(\arccos^{-1} \phi_x) P_{L,x} \pm \tan(\arccos^{-1} \phi_x) P_{ES,k} - Q_{w,n} \right] P_{by} - \beta_{xy} (P_{L,x} + P_{ES,k} - P_{w,n}) Q_{by} \right\} \end{cases} \quad (15)$$

式中: α_{xy} 、 β_{xy} ——第 x, y 条母线节点之间有功网损变量的实部、虚部;

γ_{xy} 、 ξ_{xy} ——第 x, y 条母线节点之间无功网损变量的实部、虚部;

P_{by} 、 Q_{by} ——并网节点 y 的有功、无功功率;

X ——整个风电场分区域总数;

ϕ_x 、 ϕ_y ——第 x, y 条母线的相位角。

考虑场级网络损耗的优化目标为

$$f_4 = \min \sum_{i=1}^{24} \sqrt{P_{WT,i}^2 + Q_{WT,i}^2} \quad (16)$$

将式(15)代入,求取整个风电场网损的最小值。

2.3 多目标优化求解

在考虑储能寿命对风储电站调控的影响后,考虑分层调控的方式,下层调控的目标为区域网损最小,储能电池过充、过放的能量偏差最小,上层调控的目标为在满足电网调度需求的同时兼顾下层调控需求并减少网络损耗。优化目标求解同样分为两层,其目标函数为

$$f = \min[a_1(c_1f_1 + c_2f_2 + c_3f_3) + a_2f_4] \quad (17)$$

其中: a_1 、 a_2 、 c_1 、 c_2 、 c_3 为权重系数,且满足 $a_1 + a_2 = 1$, $c_1 + c_2 + c_3 = 1$ 。

采用改进遗传算法对风储电站进行调控,根据自适应权重及自适应罚函数来优化多目标,具体求解的流程如图4所示。

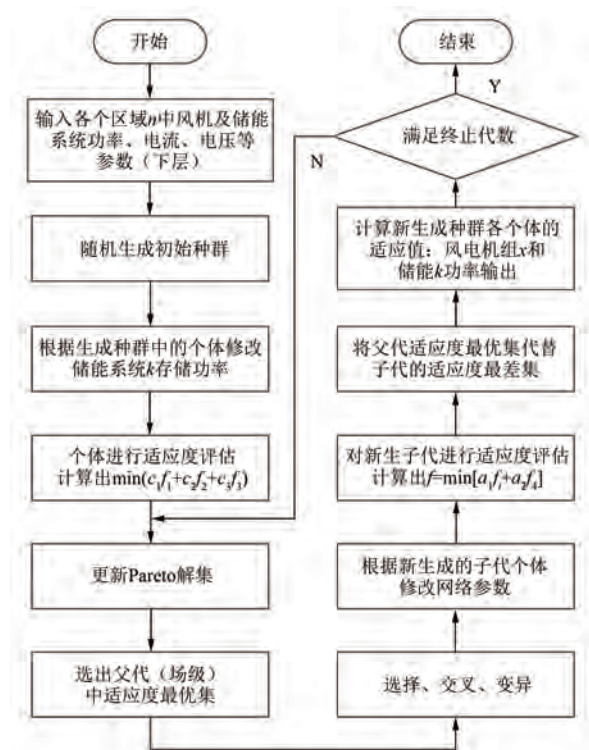


图4 改进遗传算法求解

3 算例测试

以辽宁某风电场为例,根据海拔高度不同将此风电场分为4个区域,单机容量为1.5 MW,各个区域内风电机组的台数为32、40、38、52台。配

置区域地形为海拔高度350~700 m的低山,场区规划面积约为57 km²。华润电力风能朝阳县胜利分散式风电场具有丰富的风能资源,地理位置适于建设分散式风电场。本期分散式风电工程共安装风力发电机组31台,其单机容量为1.5 MW,总装机容量为46.5 MW。

4 结语

本文考虑储能寿命对风电场调控策略的影响,提出了分层-分区域的调控方式,充分考虑储能过充、过放现象,同时考虑了下层区调控和上层场级调控中的网络损耗,根据分时电价政策对风储电站中各个单元进行调控。具体的结论如下。

(1) 根据地理优势,对风储电站进行分区域控制,通过将集中式和分布式储能协调配合调控,有效减少储能系统的过充、过放现象,提高储能系统的运行寿命。

(2) 在考虑风储电站调控过程中,同时考虑下层(区域)及上层(场级)调控中的网络损耗,根据不同调控的侧重选取权重系数,实现了整个风储电站不同调控模式的切换,使其更灵活地响应电网调度的需求。

(3) 通过改进遗传算法对风储电站优化目标的分层求解,可以快速实现下层的寻优,并通过迭代快速找到父代最优,并以此为最终调度需求,实现各个区域内功率调控的准确性。

因此,基于储能寿命损耗的风储电站优化控制方法实现了风储电站中储能系统及风机出力的合理分配,在延长储能寿命的同时提高了电网对风电的消纳能力,使得整个风电场运行经济性显著提高。

【参考文献】

- [1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等.新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1): 1-9.
- [2] 杨德友,温佳鑫,蔡国伟,等.用于提高风电场可调度性的储能系统预测控制策略[J].高电压技术,2017,43(3): 1043-1050.
- [3] LUO F J, MENG K, DONG Z Y, et al. Coordinated operational planning for wind farm with battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(1): 253-262.

(下转第45页)

$$n_{\text{iter}} \cdot (t_{\text{sum_nfa}}^{\text{GBDL}} - t_{\text{sum_nfa}}^{\text{BDL}} + t_{\text{sum_nc}}^{\text{GBDL}} - t_{\text{sum_nc}}^{\text{BDL}}) =$$

$$n_{\text{iter}} \cdot |S_G| \cdot [T_{\text{fa}} \cdot (\overline{n_N^{\text{fa}}} + \overline{n_{\text{Br}}^{\text{fa}}} + \overline{n_G^{\text{fa}}}) +$$

$$(\overline{t_N^{\text{fa}}} + \overline{t_{\text{Br}}^{\text{fa}}} + \overline{t_G^{\text{fa}}})] > 0 \quad (14)$$

证明完毕。

3 结 语

以图 2 中的 28 个节点电力系统为例对所提算法进行验证。测试方法如下:对电网中的支路集按图 2 中的编号排序形成有序支路集,每次分别断开此有序支路集中的一条支路。然后对潮流计算结果进行测试,求取相应算法的平均执行时间。

上述开断潮流程序的测试结果平均执行时间以及主要硬件和软件测试环境如表 1 所示。

表 1 算法测试环境及平均执行时间

参数名称	参数值
基于有序 BDL 树集编号潮流算法	502 μs
基于有序 GBDL 树集编号潮流算法	502 μs
基于广度优先搜索编号潮流算法	598 μs
基于树的前序编号潮流算法	688 μs
基于树的后序编号潮流算法	686 μs
基于深度优先搜索编号潮流算法	825 μs
基于树的中序编号潮流算法	826 μs
CPU	Intel E4600+1.6 GHz
内存	DDR800, 4 G
编程语言	Rust 1.11

可见,在上述测试环境下,基于有序 BDL 树集编号潮流算法平均执行时间最短,仅为 502 μs 。因此,其时间复杂度优于其他所有算法。

【参 考 文 献】

- [1] 王悍泉,金炳哲,龚喜文.船舶电力系统模拟训练系统的设计与实现[J].上海船舶运输科学研究所学报,2016,39(1): 49-53.
- [2] 谢辉,卜乐平,冯源.船舶电力模拟训练评估系统的设计和开发[J].舰船科学技术,2013,35(11): 45-48.
- [3] 徐远新,林平,徐海刚.基于 HLA 的舰载嵌入式模拟训练系统设计方案[J].军事运筹与系统工程,2012,26(2): 51-54.
- [4] 潘昕,侯新国,夏立,等.船舶电力系统的建模与仿真[J].电力科学与工程,2013,29(4): 49-53.
- [5] 康军,马伟明,付立军,等.舰船电力系统潮流计算方法[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2008,32(1): 32-35.
- [6] 冀欣,张晓峰.基于节点电势法的舰船电力系统潮流计算方法[J].船海工程,2007,36(5): 132-135.
- [7] 马秀林,徐岩,王增平,等.静态优化法编号在潮流计算中的应用[J].电力科学与工程,2007,23(2): 12-14.
- [8] 孙秋野,陈会敏,杨家农,等.牛顿类潮流计算方法的收敛性分析[J].中国电机工程学报,2014,34(13): 2196-2200.

收稿日期: 2018-04-25

(上接第 23 页)

- [4] 闫鹤鸣,李相俊,麻秀范,等.基于超短期风电预测功率的储能系统跟踪风电计划出力控制方法[J].电网技术,2015,39(2): 432-439.
- [5] JIN C L, LU N, LU S, et al. A coordinating algorithm for dispatching regulation services between slow and fast power regulating resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 1043-1050.
- [6] 章竹耀,郭晓丽,张新松,等.储能电池平抑风功率波动策略[J].电力系统保护与控制,2017,45(3): 62-68.
- [7] 赵兴勇,王帅,杨涛,等.平抑风电场功率波动的复合储能系统控制策略[J].电机与控制应用,2017,

44(7): 108-115.

- [8] 薛亚林,周建萍,崔屹.基于直流微电网的混合储能协调控制策略仿真研究[J].电机与控制应用,2017,44(8): 19-26.
- [9] 胡泽春,丁华杰,孔涛.风电-抽水蓄能联合日运行优化调度模型[J].电力系统自动化,2012,36(2): 36-41.
- [10] 崔杨,彭龙,仲悟之.双馈型风电场群无功分层协调控制策略[J].中国电机工程学报,2017,37(17): 4300-4307.
- [11] 贺军,张俊洪.风储微电网运行控制研究[J].电机与控制应用,2015,42(12): 50-54.

收稿日期: 2018-04-25