

含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置

刘舒¹, 李正力², 王翼², 马瑞², 陆丹³, 刘皓明³

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200437; 2. 许继电源有限公司, 河南 许昌 461000;
3. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 由于分布式发电的随机性、间歇性, 含分布式发电的微电网很难满足电网接入的要求。若在微电网中配置合适容量的储能装置, 并对其采取适当控制方法, 不但可以平滑分布式发电的输出功率, 而且可以达到对微电网负荷削峰填谷的作用。提出了应用上下限约束法以及加权移动平均控制法, 以满足微电网的接入要求为前提, 以最小储能配置容量为目标, 对混合储能装置进行容量优化配置的方法。仿真结果表明, 所提方法不仅能够使分布式发电出力满足微电网要求, 并可以实现对储能容量的优化配置。

关键词: 储能; 分布式发电; 优化配置; 削峰填谷; 平抑波动

Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation

LIU Shu¹, LI Zhengli², WANG Yi², MA Rui², LU Dan³, LIU Haoming³

(1. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China; 2. Xu Ji Power Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 3. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: It is difficult for the micro-grid with distributed generation (DG) to meet the requirements of connecting into the power grid because of the randomness and intermittent of DG. Equipping energy storage devices in the micro-grid and taking suitable control methods, the output power of DG can be smoothed and the peak load can also be shifted. A method for capacity allocation of hybrid energy storage system is proposed. The upper and lower constraints method and weighted moving average control method are adopted in the allocation method. The objective is to minimize the energy storage capacity. The simulation results show that the proposed control strategy not only makes the DG output power meet the requirements of the micro-grid, but also allocates the energy storage capacity optimally.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207044).

Key words: energy storage; distributed generation; optimal allocation; peak load shifting; power fluctuations

0 引言

随着经济的发展, 传统能源日趋紧张, 环境污染问题越来越严重, 各国开始把目光投向新型清洁能源的发展, 发展可再生能源发电(Renewable energy power, REP)技术成为解决传统能源所带来问题的必然选择^[1-2]。微电网技术是分布式可再生能源有效利用的重要形式, 然而分布式发电与传统电源具有很大的差别, 其主要特点在于诸如风、光等分布式发电输出的随机性和间歇性, 会对微电网的安全性和稳定性造成很大的影响。为了确保系统的安全稳定运行, 储能装置便成为微电网系统的重要

组成部分^[3-5]。

储能装置可以分为功率型储能和能量型储能两种。功率型储能装置具有响应速度快、循环充放电寿命长、充放电速率快等特点, 一般可用来平滑分布式发电的功率输出; 能量型储能装置具有储能时间长、储能容量大等特点, 适用于系统负荷的削峰填谷^[6]。微电网在并网运行时, 负荷的峰谷差和分布式发电的波动性通常是并存的。混合储能比单一的储能装置更有助于微电网系统的安全稳定运行^[7]。

在微电网中加装储能装置, 最重要的是储能装置的容量配置问题。文献[8]在风电功率分钟级分量波动特性的基础上, 以概率统计的区间估计理论确定储能系统的容量配置和最大充放电功率, 该优化方法可以以较小容量的储能设备改善风电功率的平

基金项目: 国家自然科学基金项目(51207044)

滑输出。文献[9]中混合储能系统采用小波分解算法,解耦出电池及超级电容器分量,对各储能分量统计分析,在不同置信水平和容量下,以波动量的均值、方差、波动范围及波动点数为指标,分析混合储能系统的平抑效果。文献[10]考虑了蓄电池自身运行特性限制的问题,提出了基于蓄电池内部特性建模的蓄电池容量确定方法,根据优化目标和约束条件,建立了三种不同的优化方案。文献[11]根据光伏系统-储能联合运行的特点,考虑运行过程中储能能量的动态变化过程,以储能单元的技术特性为约束,提出了负荷缺电率和能量溢出比为考核指标的光伏、储能容量的联合配置方法。在给定案例条件下,分别计算了三种类型的储能电池的容量配置,并以初始投资最小为目标,计算最优光储容量配置。文献[12]讨论了风电场中的集中储能和分布式储能结构,并根据两种储能方式的特性分别分析了两者的储能安装容量最优范围。文献[13]提出了以风电最大利用率和储能装置的最小花费为目标,采用折中方法在解决平滑风电的功率输出的同时,实现风电的最大利用率和储能装置最小花费。文献[14]以风储联合系统年收益最大为目标,提出了综合考虑风电调度功率优化和变寿命特性的电池储能容量优化模型。

本文以含 REP 的微电网为研究对象,基于储能装置存在能量高以及功率高的差异,将储能装置分为功率型、能量型两大类,并考虑微电网对 REP 的出力要求,提出加权移动平均控制法来平滑分布式发电的输出功率;同时提出上下限约束控制法来进行微电网系统负荷的削峰填谷。最后通过算例来验证本文所提模型和算法的有效性。

1 微电网对分布式电源出力要求

随着社会经济的发展,用电负荷对电力的需求逐年增大,电网由此产生的新问题日渐突出^[15-16],如负荷的不断增大导致负荷的峰谷差值增大,系统装机容量难以满足峰值负荷的需求;微电网中大规模分布式电源的接入,其输出功率具有不可控性,增加了微电网调度的难度。在微电网中加装储能装置可以实现以下两个目标,从而提高微电网输出功率的可调度性。

1.1 平滑出力波动

本文用有功功率波动率大小评价分布式发电输出功率平滑度。有功功率波动量指总输出曲线在规定时间内功率峰谷差值绝对值,而有功功率波动率

指有功功率波动量占额定输出功率的比例。计算公式如下。

有功功率波动量:

$$\beta_1 = \max |P_v(t) - P_v(t + \Delta t)| \quad (1)$$

有功功率波动率:

$$\beta_2 = \frac{\beta_1}{P_{\text{ref}}^N} = \frac{\max |P_v(t) - P_v(t + \Delta t)|}{P_{\text{ref}}^N} \quad (2)$$

式中: $P_v(t)$ 为 t 时段分布式电源平均输出功率; Δt 为设定的功率变化量的周期,一般为 5 min 或者 10 min 等; P_{ref}^N 表示分布式电源额定输出功率。

β_2 越大说明出力波动越大,本文采用风电场 10 分钟(即 $\Delta t = 10 \text{ min}$)变化率不超过 10% 作为微电网对分布式电源输出功率波动性方面的限制,即要求 $\beta_2 \leq 10\%$ 。

1.2 负荷削峰填谷

本文用峰谷差值变化率大小评价削峰填谷效果,其评价指标计算如下。

峰谷差值:

$$\Delta P = P_{\text{max}} - P_{\text{min}} \quad (3)$$

峰谷差值变化率:

$$\beta_3 = \frac{\Delta P}{P_{\text{av}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: P_{max} 、 P_{min} 分别为一天内综合负荷的最大、最小值; P_{av} 为综合负荷的平均值。其中,综合负荷是指微电网中负荷需求与分布式发电输出功率之差。

β_3 越大表明负荷峰谷差越大,若 $\beta_3 = 0$,表明微电网综合负荷在储能的作用下,能平抑成一条直线,即保持综合负荷恒定不变。

2 储能装置容量配置

2.1 平滑出力波动优化方法

2.1.1 加权移动平均法模型

储能装置通过充放电控制,快速地吸收“剩余电量”或补充“功率缺额”,实现较大的功率调节,减小微电网可能对主网造成的影响。平滑功率波动需要储能系统具备短时功率动态调节能力,可以选择超级电容器储能、超导储能和飞轮储能等功率型储能系统。

考虑到控制精度和速度的要求,本文采用改进的加权移动平均控制算法。控制模型如下^[17]。

假设采样数据为 $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$, ..., $x(K)$, 采样周期为 T_s , N 为当前阶段采样点,即控制步长。则该连续的 N 个采样点数据为 $x(k-1)$, $x(k-2)$,

$x(k-3), \dots, x(k-N)$, 那么, N 个采样数据的移动平均值为

$$y(k) = \frac{x(k-1) + x(k-2) + \dots + x(k-N)}{N} \quad (5)$$

将式(5)经过 z 变换后, 求得移动平均模型 (Moving average model, MA) 的 z 域传递函数为

$$G(z) = \frac{z^{\frac{N}{2}} - z^{-\frac{N}{2}}}{N(z^{\frac{1}{2}} - z^{-\frac{1}{2}})} z^{-\frac{N+1}{2}} \quad (6)$$

由上式可知, 移动平均模型存在 $\frac{N+1}{2}T_s$ 的时间

滞后。对移动平均模型进行改进: 在现有的数据中体现历史数据的变化趋势, 并同时考虑时间的延迟, 该种模型称为改进的加权移动平均法模型 (Modified weighted moving average model, MWMA), 其模型如式(7)所示。

$$y_{\text{mwma}}(k) = y_{\text{ma}}(k) + (T_p + \tau) \times y_{\text{dif}}(k) \quad (7)$$

式中, $y_{\text{mwma}}(k)$ 为 MWMA 模型的输出功率值; $y_{\text{ma}}(k)$ 为 MA 模型的输出功率值; T_p 为 MA 相当于 MWMA 的滞后时间; τ 为储能设备的响应时间; $y_{\text{dif}}(k)$ 为变化趋势值, 其计算过程如下。

(1) 将控制步长 N 平均分为 M 份, 则各个区间的移动平均值可用式(8)计算。

$$\bar{x}(i) = \frac{M}{N} \sum_{n=1}^M x(k - (i-1)\frac{N}{M} - (n-1)) \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (8)$$

(2) 对各个相邻区间的移动平均值进行求差计算, 则求得各个区间的变化趋势值为

$$\Delta x(i) = \bar{x}(i-1) - \bar{x}(i), \quad (i=2, 3, \dots, M) \quad (9)$$

(3) 将各个区间的变化趋势值乘以对应的权值 w , 然后进行求和运算, 最后除以区间时间 $\frac{N}{M}T_s$, 则求得 MWMA 模型的变化趋势值为

$$y_{\text{dif}}(k) = \frac{1}{\frac{N}{M}T_s} \sum_{i=1}^{M-1} \Delta x(i)w(i) \quad (10)$$

式中, w 为权重系数, 越接近 KT_s , 其变化趋势值权重越大, 则 $w(i)$ 可用式(11)表示。

$$w(i) = \frac{2(M-i)}{M(M-1)}, \quad \sum_{i=1}^{M-1} w(i) = 1 \quad (11)$$

最后将 MA 模型得到的移动平均值 $y_{\text{ma}}(k)$ 以及 $y_{\text{dif}}(k)$ 代入式(7)即可得到满足分布式电源输出功率曲线。

2.1.2 控制步长 N 的确定

输出功率曲线的平滑度受控制步长 N 的影响,

N 越大控制后的输出曲线越平滑, 所需的储能装置的容量也越大; 反之 N 越小输出曲线波动较大, 所需配置的储能容量相对减少。为了同时满足曲线平滑度以及储能装置的容量尽可能最小的要求, 要对 N 进行控制。若 N 的值逐渐增大, 当 $N=N^*$ 时, $\beta_2 \leq 10\%$, 则此时 N^* 为最优控制步长。控制步长 N 的控制流程如图 1 所示。

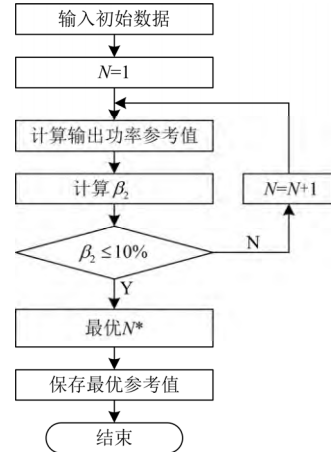


图 1 控制步长的优化流程图

Fig. 1 Optimization flow chart of control step

2.2 削峰填谷优化方法

本文采用上下限约束控制法对负荷进行削峰填谷控制。上下限约束控制, 即设定负荷需求曲线的上下限, 并根据负荷需求曲线与上下限的功率差, 计算储能系统各时段的充放电功率。其控制原理如图 2 所示, 图中 P_g 为综合负荷, P_{up} 为峰值波动上限, P_{low} 为谷值波动下限。

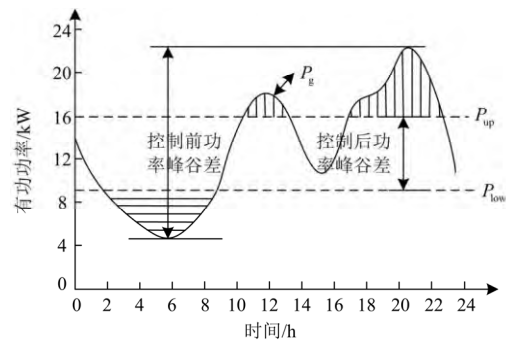


图 2 削峰填谷控制策略示意图

Fig. 2 Diagram of peak load shifting control strategy

由图 2 可知, 系统中加入储能装置后, 当综合负荷功率低于谷值功率下限时, 控制储能装置适当充电, 如图中横线阴影部分所示; 当综合负荷功率高于峰值功率上限时, 控制储能装置适当放电, 如图中竖线阴影部分所示。则削峰填谷控制后的综合负荷处于上下限约束范围内, 即认为达到了削峰填

谷的作用。

对负荷进行削峰填谷控制,首先要确定 P_{up} 、 P_{low} 的大小。 P_{up} 、 P_{low} 的大小由式(12)确定。

$$\begin{aligned} P_{up} &= (1 + 0.5\beta_3)P_{av} \\ P_{low} &= (1 - 0.5\beta_3)P_{av} \end{aligned} \quad (12)$$

假设各时段充放电功率为

$$P_b(t) = P_g(t) - P'_g(t) \quad (13)$$

式中: $P_b(t)$ 为储能系统的充放电功率; $P_g(t)$ 和 $P'_g(t)$ 分别为时刻 t 综合负荷实际值和削峰填谷后的期望值。

削峰填谷控制策略如下:分布式电源出力与负荷叠加得到综合负荷功率 P_g ,并将其与功率上下限约束进行比较判定。当 $P_g \geq P_{up}$ 时,负荷需求过高,此时需要储能系统放电补充功率差额;当 $P_g \leq P_{low}$ 时,综合负荷处于低谷,需要储能装置投入运行,并处于充电状态,以增加综合负荷需求;否则,储能装置退出运行。

2.3 储能装置的容量计算

储能系统所需的最大容量具体计算步骤如下。

(1) 计算各时段储能装置的充放电功率理想值

$$P_b(k) = P_g(k) - P_{ref}(k) \quad (14)$$

式中: $P_b(k)$ 为第 k 个控制周期储能系统的充(放)电功率理想值,大于 0 时表示储能系统放电; $P_g(k)$ 为第 k 个控制周期实际综合负荷大小; $P_{ref}(k)$ 为期望综合负荷功率值,这里取为削峰填谷控制或者平抑功率波动控制后的负荷功率理想值。

(2) 根据确定的储能系统实际输出功率,对控制周期内的储能系统的充放电电量进行累计。设第 k 个控制周期结束时,储能系统的剩余能量用 $E(k)$ 表示,则

$$E(k) = E_0 + \sum_{m=1}^k P_b(m) \cdot T_c \quad (15)$$

式中: T_c 为平抑控制周期; E_0 为储能系统的初始能量。

(3) 计算各控制周期内,储能系统的最大、最小能量差值,则为了满足平抑过程的能量需求,需要配置的储能系统容量 W 由下式确定。

$$W = \max_k E(k) - \min_k E(k) \quad (16)$$

式中, $\max_k E(k)$, $\min_k E(k)$ 分别代表整个样本数据控制周期内,储能系统的最大、最小容量。

(4) 考虑到储能系统放电深度(Depth of discharge, DOD)、温度以及实际运行效率的限制,

储能系统应具备的容量可用式(17)进行修正^[18]。

$$W' = \frac{W \times A \times K}{\eta \times DOD} \quad (17)$$

式中: W 为理想条件下的储能系统容量; A 为安全系数(一般取值为 1.1~1.4); K 为温度修正系数(一般 0℃ 以上取 1, -10℃ 以上取 1.1, -10℃ 以下取 1.2); η 为储能系统的功率转换效率(取 0.78); DOD 为放电深度(一般取 80%)。

根据式(17)可以得到经过修正后储能装置的容量。

2.4 混合储能系统的应用

接入微电网的风力发电、光伏发电等分布式发电系统出力具有很大的随机性和间歇性,为保证微电网的自治运行,要求储能系统兼有功率密度与能量密度高的特点。就目前的储能技术发展水平而言,功率密度与能量密度难以两全,致使混合储能系统成为研究热点^[19-20]。混合储能系统充分发挥能量型储能系统能量密度大以及功率型储能系统功率密度大的优势。应用于微电网的混合储能系统结构如图 3 所示。

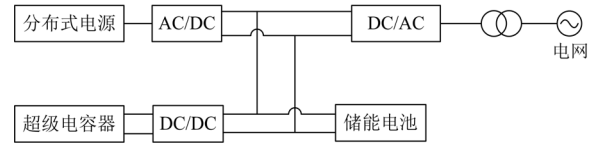


图 3 混合储能的系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of hybrid energy storage system

根据有功功率波动频率大小,可将分布式发电输出功率分为以下两部分。

(1) 高频波动功率 P_1 : 自然因素瞬间变化以及发电系统运行状态突变时导致的系统出力快速波动,其持续时间较短,能量波动较小。

(2) 低频波动功率 P_2 : 自然因素持续变化以及系统内负荷变化引起的系统出力波动。其波动幅度较小,但持续时间较长,能量波动较大。

对上述输出功率进行平抑控制时,需要储能系统同时具有快速的功率吞吐(平抑 P_1)和较高的能量支持(平抑 P_2)的能力。相比较而言,蓄电池能量密度高、循环使用寿命短;超级电容器储能恰好相反,其功率密度高,但能量密度较低、循环寿命长。一种典型的混合储能系统配置方案是将两者结合。

用 P_g 代表风光发电输出功率, P_L 代表微电网中负荷功率, P_{ref} 代表微电网的参考输出功率, P_{hess} 代表混合储能输出功率, P_{bess} 、 P_{uc} 分别代表蓄电池和超级电容器的输出功率,满足以下的功率平衡:

$$\begin{cases} P_g - P_L + P_{\text{hess}} = P_{\text{ref}} \\ P_{\text{hess}} = P_{\text{bess}} + P_{\text{uc}} \end{cases} \quad (18)$$

由于分布式风光发电系统输出功率不稳定, 负荷也具有波动性, 所以微电网参考有功功率 P_{ref} 具有间歇性以及随机性等特点, 利用混合储能装置进行协调控制, 减少 P_{ref} 的随机波动。

3 仿真分析

3.1 平滑出力波动分析

分布式发电如风力发电, 太阳能发电等由于受自然因素的影响, 输出功率具有较大的波动性。本文假设微电网中分布式电源的实际输出曲线如图4中黑实线所示, 采样周期为5 min, 一天24个小时, 共288个数据。

储能装置的响应时间 τ 远小于控制策略的滞后时间 T_p , 这里取为 10 s。假设分布式电源额定功率为 100 kW, 控制步长平均分为 $M=2$ 份, 取 $\beta_2 \leq 10\%$ 时, 计算出最优控制步长为 $N^*=25$, 通过加权移动平均控制法得到的平抑后的期望功率曲线如图4中黑粗线所示, 功率型超级电容器储能装置的功率输出曲线如图5所示。

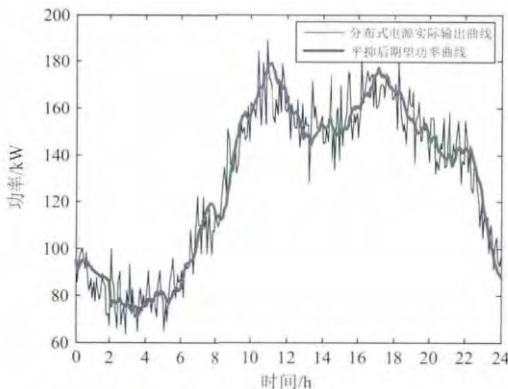


图4 储能系统平抑分布式电源输出功率效果

Fig. 4 Smooth curve of energy storage system

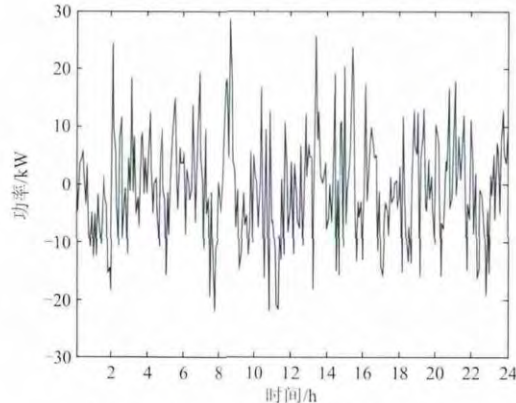


图5 储能系统各时段输出功率值

Fig. 5 Output power of energy storage system

若不计任何损耗, 储能装置完全处于理想充放电状态, 根据仿真结果可选择超级电容器储能装置的容量为 21 kWh, 若计及放电深度和损耗等因素, 取安全系数为 1.3, 温度修正系数为 1.2, 转换效率为 0.78, 充放电系数为 0.8, 那么根据式(17)对储能容量进行修正, 计算得储能装置额定容量可选择为 52 kWh, 那么为了平抑分布式电源的功率波动以达到微电网的要求, 可配置额定功率为 30 kW、额定容量为 52 kWh 的功率型储能。

3.2 负荷削峰填谷分析

在仿真分析中, 系统中的负荷有功需求最大值为 180 kW, 分布式发电输出有功峰值为 70 kW。

由于分布式发电出力曲线与日负荷曲线都是连续变化的, 将数据离散化有利于优化计算。本文将负荷分成若干区间(1 h/区间), 并且认为每个区间内分布式电源出力与负荷保持恒定不变。离散数据取为该区间内实际数据的平均值。则分布式电源出力曲线与负荷综合需求曲线如图6所示, 综合需求平均值为 128 kW。

假设大电网要求微电网满足削峰填谷的指标为 $\varepsilon_3 = 20\%$, 则加入储能装置后的削峰填谷效果如图7所示。

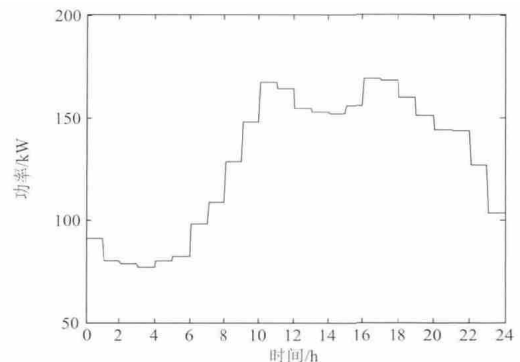


图6 微电网分布式发电和负荷综合曲线

Fig. 6 Total power curve of the distributed generation and load demands in the micro-grid

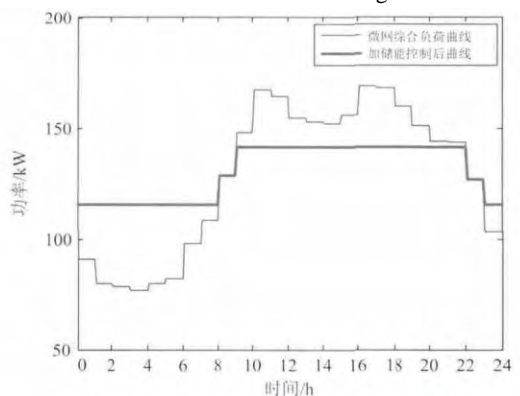


图7 储能系统削峰填谷控制效果图

Fig. 7 Result of peak load shifting control by energy storage system

由图7可知,储能装置在0~8 h与22~24 h时段处于充电状态,增加系统负荷,达到填谷的作用;在10~22 h时段处于放电状态,达到削峰的作用;在8~10 h以及22~24 h既不充电也不放电。根据式(17),取安全系数为1.3,温度修正系数为1.2,转换效率为0.78,充放电系数为0.8,修正后容量型蓄电池储能装置的额定容量可选择为570 kWh。

4 结论

本文对于同一微电网系统中的混合储能系统,利用加权移动平均法计算功率型储能装置的容量配置,以平抑微电网分布式电源的功率波动,利用上下限约束法计算能量型储能装置的容量配置,对微电网综合负荷进行削峰填谷。仿真结果验证了两种控制方法能够得到最优的储能装置容量配置,并能实现微电网中分布式电源功率波动抑制和综合负荷削峰填谷的作用,本文工作对微电网中储能装置的容量配置具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 肖宏飞,刘士荣,郑凌蔚,等.微型电网技术研究初探[J].电力系统保护与控制,2009,37(8):114-119.
XIAO Hongfei, LIU Shirong, ZHENG Lingwei, et al. A preliminary research on microgrid technology[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(8): 114-119.
- [2] 朱璇,陈得宝,方振国,等.平均成本下垂控制策略在分布式发电中的应用[J].电力系统保护与控制,2015,43(10):14-20.
ZHU Xuan, CHEN Debao, FANG Zhenguo, et al. Mean cost-based droop scheme in the application of distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 14-20.
- [3] 许丹,丁强,潘毅,等.基于经济调度的微电网蓄电池容量优化[J].电力系统保护与控制,2011,39(17):55-59.
XU Dan, DING Qiang, PAN Yi, et al. Study on optimizing capacity of storage battery in microgrid system based on economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 55-59.
- [4] 杨艳红,裴玮,邓卫,等.计及蓄电池储能寿命影响的微电网日前调度优化[J].电工技术学报,2015,30(22):172-180.
YANG Yanhong, PEI Wei, DENG Wei, et al. Day-ahead scheduling optimization for microgrid with battery life model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 172-180.
- [5] 黄际元,李欣然,曹一家,等.考虑储能参与快速调频动作时机与深度的容量配制方法[J].电工技术学报,2015,30(12):454-464.
HUANG Jiyuan, LI Xinran, CAO Yijia, et al. Capacity allocation of energy storage system considering its action moment and output depth in rapid frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 454-464.
- [6] 肖峻,张泽群,张磐,等.用于优化微网联络线功率的混合储能容量优化方法[J].电力系统自动化,2014,38(12):19-26.
XIAO Jun, ZHANG Zequn, ZHANG Pan, et al. A capacity optimization method of hybrid energy storage system for optimizing tie-line power in microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 19-26.
- [7] 陈伟,石晶,任丽,等.微网中的多元复合储能技术[J].电力系统自动化,2010,34(1):112-115.
CHEN Wei, SHI Jing, REN Li, et al. Composite usage of multi-type energy storage technologies in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 112-115.
- [8] 冯江霞,梁军,冯益坤.基于风电功率min级分量波动特性的风电场储能容量优化计算[J].电力系统保护与控制,2015,43(3):1-6.
FENG Jiangxia, LIANG Jun, FENG Yikun. Optimization calculation of wind farm storage capacity based on minute-scale wind power characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 1-6.
- [9] 马速良,蒋小平,马会萌,等.平抑风电波动的混合储能系统的容量配置[J].电力系统保护与控制,2014,42(8):108-114.
MA Suliang, JIANG Xiaoping, MA Huimeng, et al. Capacity configuration of the hybrid energy storage system for wind power smoothing[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 108-114.
- [10] 朱兰,严正,杨秀,等.风光储微网系统蓄电池容量优化配置方法研究[J].电网技术,2012,36(12):26-31.
ZHU Lan, YAN Zheng, YANG Xiu, et al. Optimal configuration of battery capacity in microgrid composed of wind power and photovoltaic generation with energy storage[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 26-31.
- [11] WESTERMANN D, NIEOLAI S, BRETSCHNEIDER P. Energy management for distribution networks with storage system —— a hierarchic approach[C] // Power Energy Society General Meeting —— Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, PA, USA, 2008.

- [12] WEI Li, GÉZA J. Comparison of energy storage system technologies and configurations in a wind farm[C] // Power Electronics Specialists Conference, Orlando, FL, USA, 2007: 1280-1285.
- [13] JIANG Zhe, FENG Jiangxia, SUN Yandong, et al. Wind farm energy storage capacity optimization based on PSO[C] // Natural Computation (ICNC), 2013 Ninth International Conference on, 23-25 July, 2013.
- [14] 易林, 姜素华, 吴耀武, 等. 基于变寿命模型的改善风电可调度性的电池储能容量优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 53-59.
YI Lin, LOU Suhua, WU Yaowu, et al. Optimal battery capacity based on lifetime predication for improving the schedulability of the wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 53-59.
- [15] 李强, 袁越, 谈定中. 储能技术在风电并网中的应用研究进展[J]. 河海大学学报, 2010, 38(1): 115-122.
LI Qiang, YUAN Yue, TAN Dingzhong. Progress on application of energy storage technology in wind power integration[J]. Journal of Hohai University, 2010, 38(1): 115-122.
- [16] 吕学勤, 刘刚, 黄资源. 电力调峰方式及其存在的问题[J]. 电站系统工程, 2007, 23(5): 37-40.
LÜ Xueqin, LIU Gang, HUANG Ziyuan. The adjusting discharge peak methods and the exiting questions[J]. Power System Engineering, 2007, 23(5): 37-40.
- [17] 李孝波, 邓浩, 池源. 一种平滑光伏并网发电系统输出功率的方法研究[J]. 电力学报, 2011, 26(5): 363-367.
LI Xiaobo, DENG Hao, CHI Yuan. Research on methods for smoothing the output power of the grid-connected PV generation system[J]. Journal of Electric Power, 2011, 26(5): 363-367.
- [18] 田军, 朱永强, 陈彩虹. 储能技术在分布式发电中的应用[J]. 电气技术, 2010(8): 28-32.
TIAN Jun, ZHU Yongqiang, CHEN Caihong. Application of energy storage technologies in distributed generation[J]. Electrical Engineering, 2010(8): 28-32.
- [19] DURYEA S, ISLAM S, LAWRENCE W. A battery management system for stand-alone photovoltaic energy systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 7(3): 37-41.
- [20] CHIANG S J, CHANG K T, YEN C Y. Residential photovoltaic energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 45(3): 385-394.

收稿日期：2015-04-12； 修回日期：2015-11-27

作者简介：

刘 舒(1987-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为微网和智能用电；

李正力(1976-), 男, 本科, 研究方向为电能质量和新能源储能。

(编辑 姜新丽)