

混合储能平抑微电网功率波动方法研究

传统的蓄电池—超级电容混合储能系统采用低通滤波的方式对各储能单元提出能量和功率要求，但是由于其不能动态地对滤波器的滤波常数调整，寻优时容易陷入局部最优解，故存在平抑负载波动效果差，且减小负荷曲线峰谷差的功能差的问题。优化了锂电池与超级电容的混合储能系统的拓扑结构，在直流母线上直接并联，以便实现超级电容和蓄电池两个不同的储能单元共同对直流母线进行平抑。同时构建了混合储能系统中以平抑直流母线上的负荷曲线和以缩减日间峰谷差为目标的多目标函数数学模型，并采用改进后的粒子群算法求解目标函数。实时优化两级低通滤波器的时间常数和补偿系数，确立混合储能系统中的不同储能器件的最优出力系数，使改进过后的混合储能系统能够较好地达到平抑负荷波动和削减负荷曲线峰谷差的目的。并通过实验，验证了提出的充放电控制策略的系数求解的有效性。

吴铁洲 王越洋 张颂冀/湖北工业大学太阳能高效利用湖北省协同创新中心

0 引言

微电网是一种由负荷和微电源共同组成的系统。微电网内部的电源主要由电力电子器件负责能量的转换，并提供控制。可同时满足用户对电能质量和供电安全方面的需求。近些年来，由于微电网具有良好的可靠性和可控性，正取得越来越广泛的应用。但是，微电网容量有限，当负载出现短时间内频繁、强烈的波动时，微电网的母线电压也会随之出现波动。这种情况会极大地影响微电网的电能质量，危害微电网的稳定可靠的运行。混合储能被认为是解决问题的措施之一。一般而言，储能器件分为功率型和能量型。前者（如超级电容）

的功率密度大，响应速度快，但是能量密度较小；后者（如蓄电池）的能量密度大，但响应速度慢，不适合频繁地充放电，但功率密度较小。在结合这两种储能器件的储能特性后组成的混合储能系统，可以充分发挥两种储能设备技术上的互补性。

混合储能系统的控制策略已经在许多文献中进行了研究和实践。文献[1]通过采集锂电池的充放电状态，进而确定超级电容的出力系数。文献[2]采用了改进滤波补偿系数的方法得到蓄电池的参考功率，同时对超级电容采用定电压控制。文献[3]提出了一种新型的混合储能拓扑结构，分析了功率型和能量型混合储能不同拓扑结构的优缺点，总结出混合储能拓扑结构选取的一般原则。文献[4]考虑了微电网中的负载具有波动性大、随机性强的特点，具有一定的可控性，提高传统电网接纳分布式可再生能源的能力。文献[5]通过采用智能优化算法解决混合储能中的平抑响应慢的问题，却不能很快地找出最优出力比的问题。

本文以超级电容（SC）和蓄电池（Battery）组成混合储能系统为例，首先就拓扑结构阐明了控制原则。提出以改进的两阶滤波器为基础，以平抑负荷波动和负荷曲线峰谷差为目标，以改进的粒子群算法为求解目标函数的算法的新的控制方法。并搭建了软件和硬件的实验平台，进行了实验。实验结果表明，在使用了所提出的控制策略后，微电网直流母线上的功率波动得到了有效的抑



吴铁洲/教授

关键词/Keywords

混合储能 ·
低通滤波器 ·
粒子群算法 ·

国家自然科学基金项目（51247004）PHEV和EV用动力电池充电关键技术基础研究。

制，同时削减了负荷曲线的峰谷差。

1 混合储能系统总体结构

混合储能系统组成的微电网结构图如图1所示。

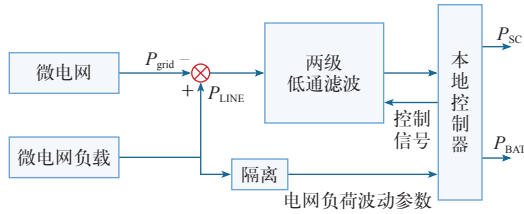


图1 混合储能系统结构图

图1中的能量关系式如下，即

$$P_E = P_{SC} + P_{BAT} \quad (1)$$

$$P_{LOAD} = P_E + P_{LINE} \quad (2)$$

式（1）、式（2）中， P_E 为混合储能系统的功率； P_{LINE} 为微电网的直流母线功率； P_{SC} 为混合储能系统中超级电容担负的功率； P_{BAT} 为混合储能系统中蓄电池担负的功率。

由图1可以看出，微电网上的负载功率实时波动，母线上的功率也会产生相应的波动，对母线的电能质量会产生不利影响。但是通过引入混合储能系统，通过相应的控制策略控制混合储能系统中的不同储能器件承担不同的功率波动，可以较好地提高母线电能质量。但如何快速准确地确定混合储能系统的各储能单元的出力系数，是当前混合储能系统亟待解决的问题。为了解决此问题，首先需要区分出高频、中频和低频的负载波动。再根据各储能单元的特性，分别承担不同频率的负载。因此，引入了两级低通滤波器。再将滤波后的参数交给本地控制器。本地控制器将采集到的电网负荷波动的参数经过处理转化为功率变换器的控制信号，最终得出超级电容的功率和蓄电池的功率^[7-9]。

下面首先介绍优化后的系统拓扑结构，并介绍改进后的二阶低通滤波器。然后分析系统的具体要求后提出多目标函数模型，并用改进的粒子群算法对多目标函数进行求解。最后进行实验验证，运用所提出的控制策略后，对平抑负载波动和削减负荷曲线峰谷差有较好的效果。

2 改进后混合储能拓扑结构及低通滤波器结构分析

2.1 改进后的混合储能拓扑结构

传统的混合储能拓扑结构，超级电容和蓄电池通过DC/AC变流器在交流侧并联。而本文中的拓扑结构如图2所示，将超级电容和蓄电池通过DC/DC功率变换器组直接在直流母线上并联，DC/DC功率变换器组中有不同的功率变换器，实现混合储能单元中的不同储能器件的独立控制。相较于传统的拓扑结构，这种结构的优点在于，通过DC/DC功率变换器的变流、调压的功能连接两种不同的储能装置，可以方便地对不同的储能装置进行直接控制，共同维持直流母线电压恒定。同时，由于可以相对独立地控制两种储能装置，电池和超级电容的容量可以通过微电网设计之前的调研获得。进而优化设计系统的额定容量，在不越界的情况下深度放电，充分利用其储存的能量。负载的波动频率通过实时在线检测获得，并输入两级低通滤波器，由两级低通滤波器滤出高频、中频和低频的负荷波动。根据滤波得出的结果，经由算法控制确定不同储能装置的出力系数。通过实时采集电网的参数，及时调整滤波器的参数，达到平抑负荷波动和削减负荷曲线峰谷差的目的^[10-12]。

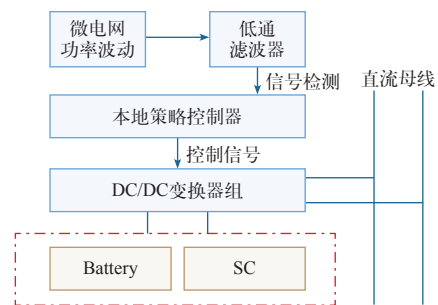


图2 混合储能结构拓扑图

通过对混合储能的拓扑结构的分析可以看出，不论混合储能系统处在充电或者放电的状态，两阶低通滤波器都是维持系统正常、稳定运行的关键。因此，为了达到提高混合储能系统平抑负荷波动的能力和削减负荷曲线峰谷差的目标，能够动态地调整两级低通滤波器的参数，使其能够达到较好的控制效果显得尤为重要。另

外, DC/DC变换器是依靠控制信号工作的。为了产生这样一组控制信号, 需要设置DC/DC变换器的控制器。

2.2 改进后的低通滤波器

混合储能系统中加入了相应的补偿和调整系数后的两级低通滤波器的构造如图3所示。由图3可以分析出以下关系, 即

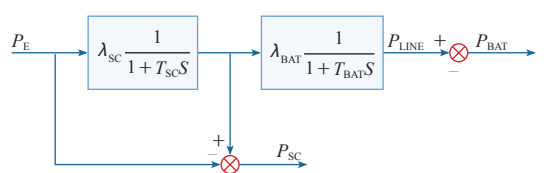
$$\begin{cases} P_{SC} = \left(\frac{\lambda_{SC} - 1 - T_{SC}S}{1 + T_{SC}S} \right) P_E \\ P_{BAT} = \left[\frac{\lambda_{SC}\lambda_{BAT} - \lambda_{SC}(1 + T_{BAT}S)}{(1 + T_{SC}S)(1 + T_{BAT}S)} \right] P_E \end{cases} \quad (3)$$


图3 改进后的两级低通滤波器

式中, λ_{SC} 为前级滤波器的补偿系数; λ_{BAT} 为后级滤波器的补偿系数。

由于巴特沃兹滤波器的特性原因, 滤波之后信号会有衰减, 所以需要添加补偿系数。当混合储能系统地处在不同的充放电状态和功率变化率时, 补偿系数也不同。

考虑到, 一阶巴特沃兹低通滤波器的特性, 截止频率具有 -45° 的相位延迟, 滤波之后会导致信号衰减, 幅值偏小或偏大。当 $P_E > 0$, 且 $dP_E/dt > 0$ 时, 需要令补偿系数大于1; 当 $P_E > 0$, 且 $dP_E/dt < 0$ 时, 需要令补偿系数小于1; 当 $P_E < 0$ 时, 则相反。

具体的 λ_{SC} 和 λ_{BAT} 取值 (以混合储能放电为例) 如下式, 即

$$\begin{cases} \lambda_{SC} = 1 + k_1 (dP_H / dt) \\ \lambda_{BAT} = 1 + k_2 (dP_H / dt) \end{cases} \quad (4)$$

式中, k_1 、 k_2 为调整系数, 可以根据经验或者算法计算来确定; T_{SC} 、 T_{BAT} 的取值则是决定了两级低通滤波器各自的截止频率, 进而关系到混合储能系统中各储能器件的出力。

混合储能系统应具有对负载波动实时监测与快速跟踪的功能, 因此快速而准确地得到 T_{SC} 、 T_{BAT} 的取值十分重要。参数的具体取值由后面的具体

算法得出。

3 多目标函数求解

3.1 多目标函数的提出

根据混合储能系统的实际运行情况, 以提高混合储能的平抑负荷波动的能力和缩减负荷波动的日间峰谷差为目标的目标函数。

为了更加理想地使控制策略达到预期目的, 做出以下规定: 控制策略的周期为1 h, 将1 h分为60个时段。目标函数计算公式为

$$\begin{cases} F_1 = \min \sum_{i=1}^{60} (P_{LOAD_i} - P_{LINE_i})^2 \\ F_2 = \min [\max (P_{LINE_j}) - \min (P_{LINE_k})] \end{cases} \quad (5)$$

式中, P_{LOAD_i} 为第*i*个时段微电网中负载的功率; P_{LINE_i} 为第*i*个时段微电网中直流母线的功率; $\max (P_{LINE_j})$ 为一个控制策略周期内母线功率最大的某一时段; $\min (P_{LINE_k})$ 为一个控制策略周期内母线功率最小的时段。

3.2 对粒子群算法的改进

粒子群算法是一种基于群智能启发式的全局优化算法。算法的核心思想是参照群体之中目前处于最优位置的个体, 和本粒子曾经达到过的最优位置来确定以及调整下一步搜寻的方向和大小。其数学表达为

$$\begin{cases} x_{id} = x_{id} + v_{id} \\ v_{id} = wv_{id} + c_1r_1(p_{id} - x_{id}) + c_2r_2(p_{gd} - x_{id}) \end{cases} \quad (6)$$

式中, c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为(0, 1)之间的随机数; w 为惯性权重因子。

各粒子*i*有*d*维度的位置向量 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ 和速度向量 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$, 在算法的初始阶段, 会将每个粒子随机分布到空间中, 然后计算每个粒子在当前, 位置的适应度 $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$ 。在每次迭代之前, 每个粒子都会根据自身惯性、经验以及群体最优值所经历过的位置 $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$ 来调整和计算本粒子的速度向量和位置, 直到发现最好的位置 p_{best} 。

但是传统的粒子群算法在求解的过程中, 虽然算法具有收敛速度快的优势, 但却存在一种被

称为“早熟”的现象。当某粒子处在局部最优解时，周边的其他粒子会迅速地对此粒子靠拢，使得算法陷入局部最优解。其次，算法中的 w 的取值对算法结果的影响也很大，较大的 w 有利于算法的快速收敛，较小的 w 有利于算法提高搜索准确度。结合混合储能系统的实际工作情况，加入了一种自调整的策略，即设置最大局部搜索迭代次数。当经过规定迭代次数后，如果种群的 p_{best} 依然不能达到系统误差的需求时，则保存当前 p_{best} ，重新将局部最优解附近的粒子初始化，重新搜索。并使 w 按式(7)进行修正，实现当粒子距离全局最优值较远时，提高 w 的值，使搜索速度快，加速系统的收敛。当粒子距离全局最优值较近时减小 w 的值，提高搜索准确度。

$$w = \begin{cases} w' + k' \frac{dv_{id}}{dt} & g'_{\text{best}} > \Delta \text{error} \\ w' - k'' \frac{dv_{id}}{dt} & g'_{\text{best}} < \Delta \text{error} \end{cases} \quad (7)$$

式中， w' 为 w 的参考值； k' 、 k'' 为补偿系数； v_{id} 为当前粒子的速度；其中 Δerror 为系统的许可误差。

同时，为了发挥所有粒子中的优势粒子应该具有的优势，增加算法的运行效率。在算法中还引入了一种淘汰判别策略。即把系统中的每次迭代中适应度连续变差的粒子进行复位，返回位置重新搜索。

3.3 多目标函数的求解

由于系统存在两个目标函数，需要对目标函数进行处理。传统的方法是引入比例系数，考虑各目标函数对粒子飞行的影响，确定比例系数。但是这种方法无法精确搜索全局最优值，而且当目标函数的数量进一步增加后，由于此种方法确定比例系数不仅需要庞大的计算量，还会导致误差进一步扩大。

因此，在本文中使用的整体求解的方法，通过多目标函数来共同指导各粒子在决策变量空间中的飞行。由于有多个目标函数的存在，导致粒子既不沿着 F_1 的函数方向运动，也不沿着 F_2 的函数方向运动，而是沿着 F_1 、 F_2 的函数之间的某一方

向运动，使其最终落入非劣最优解中。具体流程如下。

1) 首先找到每个粒子对应的每个目标函数的全局极值。本例中应找到 $G_{\text{best}}[1]$ 和 $G_{\text{best}}[2]$ 。

2) 其次找到每个粒子对应的每个目标函数在运动过程中达到的个体极值。本例中应找到 $P_{\text{best}}[1, i]$ 和 $P_{\text{best}}[2, j]$ 。 $P_{\text{best}}[1, i]$ 为第 i 个粒子在第一个目标函数中的个体极值； $P_{\text{best}}[2, j]$ 为第 j 个粒子在第二个目标函数中的个体极值。

3) 当算法开始时，将 $G_{\text{best}}[1]$ 、 $G_{\text{best}}[2]$ 作为默认值。当需要对各粒子的速度进行更新的时候，每个粒子的个体极值通过判断本粒子的个体极值相较于默认值得优劣。确定是选择更新后的位置，还是在个体极值中选取随机值。

经过若干次的迭代后，就可以确定在多个目标函数下的全局最优值了。

3.4 算法约束条件

在确定了目标函数后，考虑到蓄电池—超级电容的最佳运行特性和储能系统的管理策略，需要根据混合储能系统的一些基本要求确立约束条件。提出的约束如下。

1) 能量守恒约束。根据能量守恒定律，某一时刻光伏发电的出力，蓄电池的出力和超级电容的出力相加应当等于直流母线上的功率加上并网功率。数学表达式为

$$Q_{V_i} + Q_{SC_i} + Q_{BAT_i} = Q_{\text{line}_i} \quad (8)$$

式中， Q_{V_i} 为某一时段的光伏出力； Q_{SC_i} 为某一时段超级电容的出力； Q_{BAT_i} 为某一时段蓄电池的出力； Q_{line_i} 为某一时段母线负载的功率； Q_{grid_i} 为某一时段微电网的并网的功率。

2) SOC约束。储能器件的过充电和过放电都对器件的寿命和使用效果有不良的影响。因此，需要对电池和超级电容器的SOC进行限制。数学表达式为

$$\begin{cases} 15\% \leq \text{SOC}_{SC_i} \leq 90\% \\ 15\% \leq \text{SOC}_{BAT_i} \leq 85\% \end{cases} \quad (9)$$

式中， SOC_{SC_i} 为某一时段内的超级电容的SOC；

SOC_{BAT} 为某一时段内蓄电池的SOC。

3) 最大功率约束。电池和超级电容的输出功率不应大于其额定功率。

3.5 算法具体求解流程

算法的求解步骤如下。

1) 输入系统的粒子的种群规模, 最大的迭代次数, 惯性权重的初始值, 粒子速度更新的最大值, 学习因子 c_1 和 c_2 的值。

2) 随机的将粒子, 计算每个粒子在各目标函数的适应度。设定系统误差值和各粒子的个体最优解和全局最优解为某一足够精确的值。

3) 对于种群的每个粒子计算目标函数, 并按照式(3)计算飞行速度和位置, 按照式(4)确定惯性变量 w 的取值。得到并保存个体极值和全局极值。

4) 执行第2.3节提出的淘汰判别策略。

5) 判断是否达到算法停止条件, 如未达到执行步骤3)至步骤4), 如达到则输出结果。

4 改进的混合储能控制策略的实验结果分析

为了验证改进过后的微电网中各储能单元出力系数求解的正确性, 进行了实验验证。

首先通过对微电网直流母线上的功率需求波动进行了采样, 参数设定为: 直流母线在标准参考条件($T_c=25\text{ }^{\circ}\text{C}$); 直流母线的额定电压为500 V; 蓄电池的额定电压为300 V, 额定容量为500 A·h, 初始荷电状态为60%; 超级电容的额定电压为400 V, 额定容量为60 F, 初始电压为300 V。以100 kW的微电网电站为功率平滑对象。其典型的直流母线功率需求曲线如图4所示, 在采样的5 min内, 最大功率需求为105 kW, 最低功率需求为73 kW。

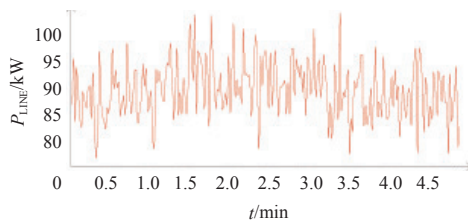


图4 直流母线上功率需求率波动图

进行对比实验测试。对改进后的两阶低通滤波器在应用了所提出的控制策略后的性能进行了测试, 以明确在满足了限制条件以后是否具备快速准确地将高频和低频的分量区分开来, 达到平抑负载电压、削减日间峰谷差的目的, 并保证各储能单元的SOC值不会越界。

如图6所示, 系统中未加入所提出的控制策略之前, 混合储能系统中蓄电池的充电放电都很频繁且波动剧烈。使用所提出的控制策略后如图5所示, 系统中的波动明显得到了抑制。通过图5、图6的对比可以发现, 该控制策略可以明显减少蓄电池的充放电次数和出力波动。

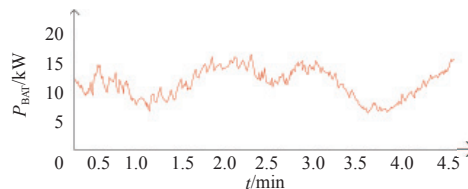


图5 使用所提出的控制策略后蓄电池的出力

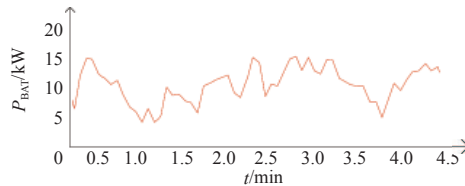


图6 使用所提出的控制策略前蓄电池的出力

对比图7、图8可以看出, 使用控制策略后, 系统中的超级电容承担了高频波动, 从而减少了高频波动对蓄电池的影响, 达到了预期的效果。

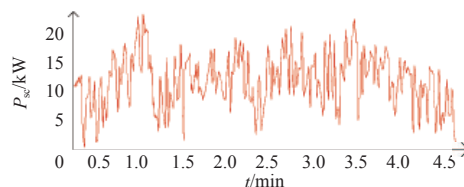


图7 使用所提出的控制策略后超级电容的出力

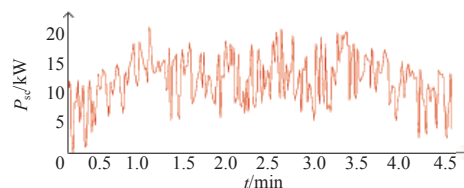


图8 使用所提出的控制策略后超级电容的出力

图9为使用了所提出的控制策略后直流母线上

的功率波动。相较于直流母线的功率需求波动,不但功率曲线的波动得到了抑制,日间峰谷差也显著减小。

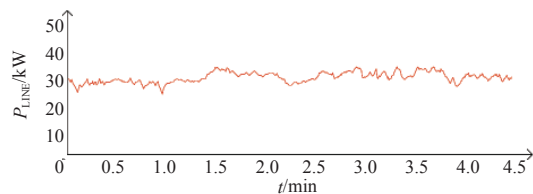


图9 使用所提出的控制策略后直流母线功率波动

比较图4、图9可以看出,在使用本控制策略后,直流母线上的功率波动峰谷差由30 kW下降至10 kW以内。且在4.5 min的控制周期内,直流母线上的功率也由之前的较为频繁和剧烈的波动趋于缓和。比较图5、图6可以看出,在使用了本控制策略后,蓄电池不再需要承担过多的负载侧的高频功率波动,其放电曲线更加平滑,工作情况得到了很大的改善,使用寿命得到了延长。比较图7、图8可以看出,使用了本控制策略后,相较于传统的控制策略,超级电容承担了更多的高频分量。由此可以看出,改进后的混合储能系统的控制策略可以充分地发挥混合储能系统中各储能单元的优势。

5 结束语

首先分析了混合储能系统中不同器件之间的特性与区别,进而引出针对不同频率的母线负载波动由不同的储能器件承担的概念。又利用改进的粒子群算法以平抑负荷波动和缩减峰谷差为目标确立目标函数。其中,改进的粒子群算法下的混合储能控制策略在寻优的过程中具有收敛速度快、算法计算效率高的特点,但是又不会陷入局部最优解。最后搭建软硬件实验平台,验证了所提控制策略能够明显减少蓄电池的充放电和出力,由超级电容承担更多的高频分量,可以减少直流母线峰谷差约60%,平抑了功率波动,验证了控制策略的有效性。但是本文没有考虑在混合储能系统中的各储能单元都处在SOC值极低的情况下,如何达到最优控制的问题,在以后的研究中会就这样的问题进一步进行研究和论述。

参考文献

- [1] 陈沼宇. 基于连续状态变量约束的微电网虚拟储能系统最优平抑控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 55-63.
- [2] Li Zhiyong, Li Min. Power balance control strategy of hybrid-bus microgrid[J]. Journal of Central South University, 2016(6): 2331-2338.
- [3] 罗鹏, 杨天蒙, 姜素华, 等. 基于频谱分析的微网混合储能容量优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 376-381.
- [4] LW Chong, YW Wong, RK Rajkumar, et al. Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 66: 174-189.
- [5] 田明杰. 基于蓄电池与超级电容器的直流微网混合储能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [6] 马速良. 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(8): 108-114.
- [7] Lee D J, Wang L. Small-signal stability analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation/energy storage system part I: time-domain simulations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008(1): 311-320.
- [8] 杨珺. 针对独立风光发电中混合储能容量优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015(3): 120-128.
- [9] 张晴, 李欣然, 杨明, 等. 净效益最大的平抑风电功率波动的混合储能容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2016(14): 40-48.
- [10] 李春敏. 超级电容用于智能变电站直流供电系统的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [11] 陈上豪. 含混合储能系统的光伏微电网能量管理策略研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [12] 陈怀鑫. 基于混合粒子群算法的城轨交通超级电容储能系统能量管理和容量配置优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.

(收稿日期: 2017-03-09) EA