

计及孤岛运行约束的微电网经济调度

提出了一种 $T-\tau$ 孤岛标准来衡量微电网对孤岛运行需求的响应能力,在此标准基础上研究计及孤岛运行约束的微电网经济调度方法。在功率平衡、各单元出力限值等条件的约束下,以微电网运行成本最小为目标建立优化模型。模型中存在大量0/1决策变量和连续运行变量,采用Benders分解法将问题分解为一个并网运行主问题和一个孤岛约束子问题。算例结果表明,此模型可以在运行成本略有增加的情况下明显提高微电网的供电可靠性。

杨 月/国网冀北电力有限公司张家口供电公司

王 阳/国网新源张家口风光储示范电站有限公司

0 引言

分布式发电特别是风力和光伏等可再生资源的利用具有巨大潜力。微电网能够有效成分布式发电单元、储能单元以及负荷,是未来智能电网的重要组成部分^[1-2]。

调度问题是微电网研究的重要内容。文献[3-4]分析了风、光出力随机性的特点,在优化微电网系统运行成本的同时减小新能源波动性的负面影响。文献[5-6]分别考虑蓄电池荷电状态以及折旧成本建立微电网优化调度的目标函数,研究储能装置在优化过程中的作用。文献[7]考虑可平移负荷单元的用电特性,提出负荷平移求解策略,实现负荷的削峰填谷。上述问题的研究都是在并网或者孤岛运行模式下进行考虑的,微电网的突出特点是具有脱离大电网孤岛运行的能力,在大电网故障或出现较大扰动影响电能质量时能够及时动作,切换到孤岛模式,保证负荷的不间断供

电。目前尚缺乏计及孤岛运行约束的微电网经济调度方法。本文提出了一种 $T-\tau$ 孤岛标准来衡量微电网对孤岛运行需求的响应能力,建立以微电网运行成本最小为目标的优化模型。采用Benders分解法^[8]将问题分解为一个并网运行主问题和一个孤岛约束子问题,快速地对模型进行求解。

1 $T-\tau$ 孤岛标准

当检测到大电网发生故障或者出现较大扰动而影响电能质量时,微电网必须能够及时动作,切换到孤岛模式。大电网恢复正常或者扰动去除时,微电网再与大电网并网同步运行。大电网故障或者出现扰动的时刻和持续时间无法预知,故微电网中的资源需要以能够保证一定时段孤岛运行的方式进行分配。

$T-\tau$ 孤岛标准用来描述微电网对孤岛运行需求的响应能力。 T 为一个调度周期的小时数, τ 为微电网可以在孤岛模式下连续运行的小时数。例如,一个 $T-2$ 孤岛标准要求微电网切换到孤岛模式可以连续可靠运行2 h。

2 Benders分解算法

Benders分解算法将具有复杂变量的规划问题分解为线性规划和整数规划,用割平面的方法分解出主问题与子问题,通过迭代的方法求解出最优值。基本原理为

$$\begin{aligned} \min \quad & c^T x + f(y) \\ \text{s. t.} \quad & Ax + F(y) \leq b \\ & x \geq 0, y \in s \end{aligned} \quad (1)$$

河北省自然科学基金(E2015502066)。



杨 月/实习监控员

关键词/Keywords

微电网 ·
经济调度 ·
孤岛运行 ·
Benders分解算法 ·

式中, y 为复杂变量; 变量 x 的子集是完全独立的; A 为系数矩阵; b 、 c 为系数向量; $f(y)$ 、 $F(y)$ 为变量 y 的函数; s 为 y 的可行集。

选择一个可行的变量 y 固定为 $\bar{y}$, 求解子问题 P1, 即

$$\begin{aligned} \min \quad & c^T x \\ \text{s. t.} \quad & Ax \leq b - F(\bar{y}) \\ & x \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

求解 P1 问题的对偶问题 P2, 即

$$\begin{aligned} \max \quad & [b - F(\bar{y})]^T u \\ \text{s. t.} \quad & A^T u \leq c \\ & u \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, u 为问题 P1 的对偶变量。

给定上界 $U_B = [b - F(\bar{y})]^T u_i + f(\bar{y})$ 。

求解子问题 P2 后, 原问题 P 便如问题 P31 所示, 即

$$\min \{ \max \{ [b - F(\bar{y})]^T u \mid A^T u \leq c, u \geq 0 \} + f(y), y \in s \} \quad (4)$$

变换 P31, 得到如下极点形式 P32, 即

$$\min \{ f(y) + \max \{ [b - F(\bar{y})]^T u_i, i = 1, 2, \dots, m \}, y \in s \} \quad (5)$$

式中, $u_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 为对偶问题 P2 的 m 个极点。

引入新变量 z , 将主问题写成问题 P3, 即

$$\begin{aligned} \min \quad & z \\ \text{s. t.} \quad & z \geq f(y) + [b - F(\bar{y})]^T u_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & y \in s \end{aligned} \quad (6)$$

给定下界 $L_B = \min z$ 。

Benders 分解方法即将原始优化问题 P 分解为子问题 P2 和主问题 P3, 反复迭代修改系统的上、下界 U_B 、 L_B , 两者相等时得到最优解。

3 微电网经济调度模型

3.1 Benders 分解结构

此模型将原问题分解成一个并网运行主问题和一个孤岛约束子问题, 流程如图 1 所示。

主问题确定可控型微电源、储能系统以及与大电网的交换功率。子问题、修正主问题确定的运行计划使微电网在孤岛需求下有足够的响应能

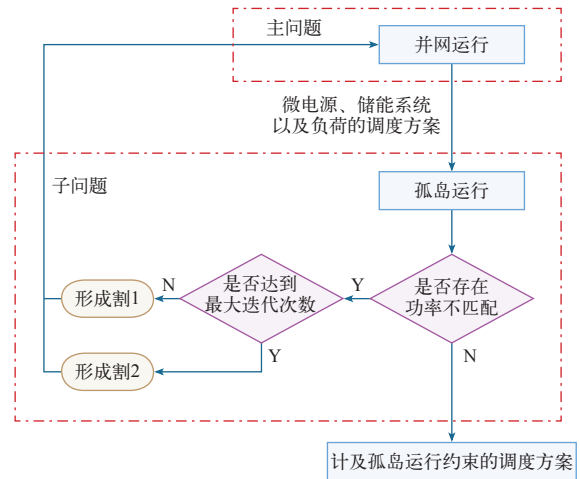


图1 经济调度流程图

力。如果并网运行主问题确定的调度方案在孤岛运行时不可行, 子问题以Benders割的形式将不匹配功率信息返回给主问题, 反复迭代求解。割1修正可控型微电源和储能系统的调度方案。修正后的方案在下一次迭代中进行验证, 如仍存在功率不匹配则修正继续进行, 直到所有的孤岛方案都是可行的为止。在割1不能得到满意方案时需要割2调整可调负荷。所有的孤岛方案确保可行时, 即是最终的调度方案。

3.2 并网运行主问题描述

并网运行主问题的目标函数是微电网运行总成本最小, 即

$$\min \sum_{t \in G} [F_i(P_{it})I_{it} + SU_{it} + SD_{it}] + \sum_t \rho_t P_{Mt} \quad (7)$$

式中, G 为微电源; P_{it} 为第 i 个微电源 t 时刻的输出功率; $F_i(P_{it})$ 为输出功率为 P_{it} 时的燃料成本; I_{it} 为微电源运行状态, 1 为运行状态, 0 为关停状态; SU_{it} 、 SD_{it} 为起、停成本; ρ_t 为预测电价; P_{Mt} 为微电网与大电网间的交换功率, 当微电网售电给大电网时, P_{Mt} 为负, 这时代表收益而不是成本。

目标函数受可控型微电源、储能系统和负荷的限制, 即

$$\sum_i P_{it} + P_{Mt} = \sum_d D_{dt} \quad \forall t \quad (8)$$

$$P_M^{\min} \leq P_{Mt} \leq P_M^{\max} \quad \forall t \quad (9)$$

$$P_i^{\min} I_{it} \leq P_{it} \leq P_i^{\max} I_{it} \quad \forall i \in G, \forall t \quad (10)$$

$$P_{it} - P_{i(t-1)} \leq UR_i \quad \forall i \in G, \forall t \quad (11)$$

$$P_{i(t-1)} - P_{it} \leq DR_i \quad \forall i \in G, \forall t \quad (12)$$

$$T_{it}^{\text{on}} \geq UT_i(I_{it} - I_{i(t-1)}) \quad \forall i \in G, \forall t \quad (13)$$

$$T_{it}^{\text{off}} \geq DT_i(I_{i(t-1)} - I_{it}) \quad \forall i \in G, \forall t \quad (14)$$

$$P_{it} \leq P_{it}^{\text{dch,max}} u_{it} - P_{it}^{\text{ch,min}} v_{it} \quad \forall i \in S, \forall t \quad (15)$$

$$P_{it} \geq P_{it}^{\text{dch,min}} u_{it} - P_{it}^{\text{ch,max}} v_{it} \quad \forall i \in S, \forall t \quad (16)$$

$$u_{it} + v_{it} \leq 1 \quad \forall i \in S, \forall t \quad (17)$$

$$C_{it} = C_{i(t-1)} - P_{it} \quad \forall i \in S, \forall t \quad (18)$$

$$0 \leq C_{it} \leq C_i^{\text{max}} \quad \forall i \in S, \forall t \quad (19)$$

$$T_{it}^{\text{ch}} \geq MC_i(u_{it} - u_{i(t-1)}) \quad \forall i \in S, \forall t \quad (20)$$

$$T_{it}^{\text{dch}} \geq MD_i(u_{it} - u_{i(t-1)}) \quad \forall i \in S, \forall t \quad (21)$$

$$D_{dt}^{\text{min}} z_{dt} \leq D_{dt} \leq D_{dt}^{\text{max}} z_{dt} \quad \forall d \in D_s, \forall t \quad (22)$$

$$\sum_{t \in [\alpha_d, \beta_d]} D_{dt} = E_d \quad \forall d \in D_s \quad (23)$$

$$T_{dt}^{\text{on}} \geq MU_d(z_{dt} - z_{d(t-1)}) \quad \forall d \in D_s, \forall t \quad (24)$$

式(8)为功率平衡约束, D_{dt} 为第 d 个负荷单元 t 时刻的功率需求。式(9)为与大电网的交换功率传输约束, P_M^{max} 、 P_M^{min} 为传输功率的上、下限值。式(10)为可控型微电源输出功率约束, P_i^{min} 、 P_i^{max} 为可控型微电源最小、最大发电功率。式(11)、式(12)为可控型微电源爬坡速率约束, UR_i 、 DR_i 为可控型微电源向上、向下爬坡速率。式(13)、式(14)为可控型微电源连续开停小时数约束, T_{it}^{on} 、 T_{it}^{off} 为连续运行、停运小时数; UT_i 、 DT_i 为最小连续开机、停机时间。式(15)、式(16)为储能系统输出功率约束, S 为储能单元; $P_{it}^{\text{ch,min}}$ 、 $P_{it}^{\text{dch,min}}$ 、 $P_{it}^{\text{ch,max}}$ 和 $P_{it}^{\text{dch,max}}$ 为充放电的最小、最大限值; v_{it} 、 u_{it} 为充、放电状态, 充电时 v_{it} 为1, u_{it} 为零, 放电时则反之。式(17)表明任意时刻充电或放电只有一种状态。式(18)、式(19)为存储系统充放电功率、容量限制约束, C_{it} 为储能的荷电状态。式(20)、式(21)中 T_{it}^{ch} 、 T_{it}^{dch} 为储能系统连续充、放电小时数; MC_i 、 MD_i 为最小连续充、放电时间。式(22)为可转移负荷功率约束, D_s 为可转移负荷; D_{dt}^{min} 、 D_{dt}^{max} 为允许的最小、最大功率; z_{dt} 为负荷状态, 消耗功率时为1, 否则为零。式(23)为可转移负荷需求约束, E_d 为第 d 个负荷单元在消费者指定的时间段内所需的全部电能; α_d 、 β_d 为负荷开始和结束

工作的时刻。式(24)为可转移负荷运行时间约束, T_{dt}^{on} 为连续运行小时数; MU_d 为最小连续运行时间。

3.3 孤岛约束子问题描述

孤岛约束子问题的目标函数是微电网失配功率值最小, 在孤岛场景 s 下的表达式为

$$\min w_s = \sum_t (SL_{1ts} + SL_{2ts}) \quad (25)$$

式中, 松弛变量 $^{[9]}SL_{1t}$ 、 SL_{2t} 为调整发电量和调整负荷量, 保证模型存在可行解; w_s 为微电网孤岛运行的失配功率值。

失配功率为零表明微电网可以不中断负荷供电切换到孤岛模式。失配功率不为零, 割1如式(26)所示修改可控型微电源和储能系统的出力计划, 即

$$w_s + \sum_{i \in G} \lambda_{its}(I_{it} - I_{its}) + \sum_{i \in S} \mu_{its}^{\text{dch}}(u_{it} - u_{its}) + \sum_{i \in S} \mu_{its}^{\text{ch}}(v_{it} - v_{its}) \leq 0 \quad (26)$$

达到最大迭代次数后, 仍不能保证所有孤岛需求时通过割2调整可调负荷, 如式(27)所示, 即

$$w_s + \sum_{i \in G} \lambda_{its}(I_{it} - I_{its}) + \sum_{i \in S} \mu_{its}^{\text{dch}}(u_{it} - u_{its}) + \sum_{i \in S} \mu_{its}^{\text{ch}}(v_{it} - v_{its}) + \sum_{i \in D} \pi_{dts}(z_{dt} - z_{dts}) \leq 0 \quad (27)$$

改变可转移负荷的出力计划即改变其原始运行时段, 新运行时段由 $[\alpha_d^{\text{new}}, \beta_d^{\text{new}}]$ 表示。由此给消费者带来的不便由惩罚项式(28)的形式附加在目标函数式(7)中, 即

$$\sum_{\forall d \in D_s} K_{ds} \Delta_{ds} \quad (28)$$

式中, D_s 为响应的可转移负荷。相应增加了约束条件式(29)~式(31), 式(29)反映了与原本运行时间的偏差, 本文假设调整后的运行时间范围比原本的要大, 如式(30)、式(31)所示, 即

$$\Delta_{ds} = (\beta_d^{\text{new}} - \alpha_d^{\text{new}}) - (\beta_d - \alpha_d) \quad (29)$$

$$\beta_d^{\text{new}} \geq \beta_d \quad (30)$$

$$\alpha_d^{\text{new}} \leq \alpha_d \quad (31)$$

改变可中断负荷的出力计划即强制其运行功

率 为 零。 惩 罚 项 如 式 (32) 所 示， 即

∑_{d ∈ D_c} K_{dc} Δ_{dc} (32)

Δ_{dc} = ∑_t D_{dt} (33)

式 中， D_c 为 响 应 的 可 中 断 负 荷。 惩 罚 项 系 数 K_{ds}、 K_{dc} 的 值 越 高 代 表 负 荷 可 调 度 性 越 不 灵 活。

4 算例分析

本算例系统包含三个可控型微电源，燃料电池（FC）、微型燃气轮机（MT）和柴油发电机（DE）；两个不可控型微电源，风力发电机（WT）、光伏电池（PV）以及一个储能系统（ESS）、五个可调负荷单元（L₁~L₅）和一个固定负荷单元（LOAD）。微电源、储能系统和可调负荷相关参数如表1~表3所示，预测电价如表4所示，不可控型微电源和固定负荷的预测值如图2所示。采用Cplex优化软件^[10]进行此混合整数规划问题求解。

表1 微电源相关参数

电源类型	燃料成本/(元/kW·h)	开停机费用/元	出力范围/kW	最短开停机时间/h	爬坡率/(kW/h)
FC	0.199	2.564	3~30	2	60
MT	0.358	3.842	4~30	2	60
DE	1.152	1.922	2~15	1	40
PV	0	—	0~5	—	—
WT	0	—	0~20	—	—

表2 储能系统相关参数

储能系统	容量/kW	充放电功率限值/kW	最短充放电时间/h
ESS	80	4~20	4

表3 可调负荷相关参数

负荷单元	类型	惩罚项系数	出力范围/kW	容量/kW	原始起停时间/h
L ₁	s	1.732	0~4	16	11~14
L ₂	s	1.800	0~4	16	16~19
L ₃	s	2.221	0.2~8	24	16~18
L ₄	s	2.508	0.2~8	24	14~16
L ₅	c	4.166	0~5	120	1~24

注：s—可转移负荷；c—可中断负荷。

表4 预测电价

时段	1	2	3	4	5	6
电价/(元/kW·h)	0.241	0.177	0.132	0.097	0.031	0.172
时段	7	8	9	10	11	12
电价/(元/kW·h)	0.271	0.386	0.517	0.526	0.810	1.000
时段	13	14	15	16	17	18
电价/(元/kW·h)	0.990	1.490	0.990	0.790	0.400	0.365
时段	19	20	21	22	23	24
电价/(元/kW·h)	0.359	0.413	0.445	0.348	0.300	0.225

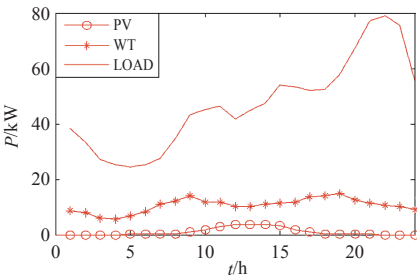


图2 不可控微电源和固定负荷的预测值

4.1 孤岛约束影响分析

并网运行时大电网与可控型发电单元的调度计划如图3所示，运行成本为303.79元。储能系统在低电价1~4时恒功率充电，高电价16~19时恒功率放电，将80 kW·h的负荷从高峰时段转移到低谷时段。可调节负荷的运行时段为用户指定的原始起停时段。

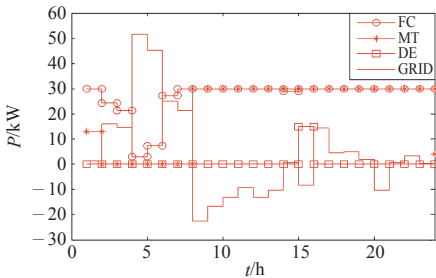


图3 并网运行经济调度结果

T-1 孤 岛 标 准 包 括 24 种 情 况， 每 种 情 况 都 有 1 h 的 孤 岛 运 行 时 间。 第 一 次 迭 代 得 到 的 并 网 运 行 主 问 题 运 行 方 案 和 不 考 虑 孤 岛 情 况 的 运 行 方 案 相 同， 这 造 成 12 种 孤 岛 运 行 情 况 下 失 配 总 功 率 为 408.81 kW·h。 经 式 (26) 调 整， 第 二 次 迭 代 失 配 总 功 率 降 低 为 17.41 kW·h。 第 三 迭 代 失 配 总 功 率 达 到 零 值， 即 所 有 孤 岛 情 况 下 均 满 足 微 电 网 孤 岛

标准。只通过割1修正就达到了满意的调度方案, 可调负荷出力计划不变。由于增加了本地资源的利用, 从主电网购买的能量减少到142.65 kW·h。微电网的运行成本为310.03元, 仅增加了6.24元。可用机组容量不能完全供应负荷时, 能量储存系统以较慢的速率, 在16~23时放电。图4显示考虑T-1孤岛标准时的优化结果。

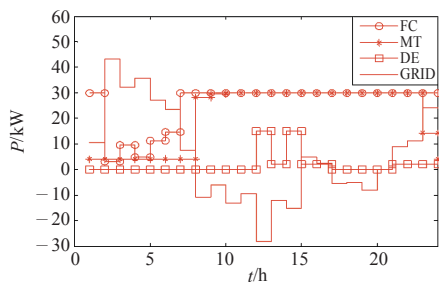


图4 T-1孤岛标准下的经济调度结果

结果表明, 当考虑到微电网孤岛运行情况时, 增加了备用机组, 成本仅增加了2.06%, 却保证了微电网切换到孤岛模式时负荷不间断供电, 大大提高了微电网供电可靠性。

4.2 孤岛时长影响分析

T-2孤岛标准下, 第一次、第二次迭代中, 总的失配功率分别为787.73 kW·h和34.86 kW·h。只进行割1在迭代已达最大限值(本文为10)时, 仍无法确保在21时和22时孤岛运行。进行割2迭代, 通过调整可调负荷出力计划消除34.86 kW·h的失配功率。不仅可控型发电单元和储能系统参与响应, 可转移负荷也参与, 并且切掉了部分可中断负荷。图5表明了微电网运行成本与孤岛标准的关系。

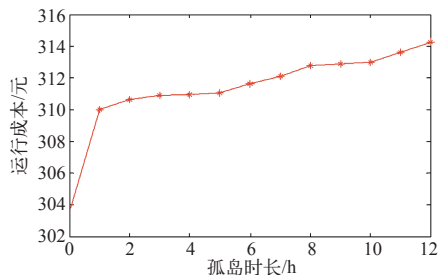


图5 运行成本与孤岛时长的关系

T-1孤岛标准下的运行成本比只考虑并网运

行的成本高, 主要由于孤岛标准下的不经济机组处于热备用状态。而孤岛标准小时数不同时成本增长非常小, 略有增加的成本主要由给消费者的补贴费用造成。

4.3 计算速度比较

本文采用 Benders 分解算法, 能够对原问题进行有效解耦, 与文献[11]的计算方法比较可以看出, 此算法在计算效率上的提高, 如表5所示。

表5 计算时间对比

	T-1标准	T-2标准
Benders分解算法	4.621 2/s	13.992 5/s
混沌二进制粒子群法	17.893 8/s	42.346 1/s

5 结束语

1) 所提出的孤岛标准反映了微电网对孤岛运行需求的响应能力。为计及孤岛运行约束的微电网经济调度研究提供概念支持。

2) 模型以微电网系统运行成本最低为目标, 确定微电源、储能系统、负荷以及与大电网交互功率的出力方案。在大电网扰动的开始时刻和持续时间未知时, 可以保证微电网在较长一段时间内可靠孤岛运行, 成本略有增加的情况下明显提高了供电可靠性。

3) 将计及孤岛运行约束的微电网经济调度问题通过Benders分解算法分解成一个并网运行主问题和一个孤岛约束子问题, 实现求解大规模非线性混合整数规划的目的, 减少了计算量, 加快了求解速度。

参考文献

- [1] Shahidehpour M, Clair J F. A functional microgrid for enhancing reliability, sustainability, and energy efficiency [J]. Electricity Journal, 2012, 25 (8): 21-28.
- [2] 刘文, 杨慧霞, 祝斌. 微电网关键技术研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 42 (14): 152-155.
- [3] 金鹏, 艾欣, 许佳佳. 基于序列运算理论的孤立

- 微电网经济运行模型 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (25): 52-59.
- [4] 罗毅, 刘明亮. 计及风险备用约束的孤网系统环保经济调度 [J]. 电网技术, 2013, 37 (10): 2705-2711.
- [5] 石庆均, 江全元. 包含蓄电池储能的微网实时能量优化调度 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33 (5): 76-82.
- [6] 沈玉明, 胡博, 谢开贵, 等. 计及储能寿命损耗的孤立微电网最优经济运行 [J]. 电网技术, 2014, 38 (9): 2371-2378.
- [7] Logenthiran T, Srinivasan D, Shun T Z. Demand side management in smart grid using heuristic optimization [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3 (3): 1244-1252.
- [8] 李颖浩, 郭瑞鹏. 基于广义Benders分解的启发式机组组合优化 [J]. 电网技术, 2012, 36 (3): 179-183.
- [9] 王彩霞, 鲁宗相. 风电功率预测信息在日前机组组合中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (7): 13-18.
- [10] 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.
- [11] 李鹏, 李涛, 张双乐, 等. 基于混沌二进制粒子群算法的独立微网系统的微电源组合优化 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33 (12): 33-38.
- (收稿日期: 2016-02-10) **EA**

(上接第19页)

- Design, analysis, and implementation of solar power optimizer for DC distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (4): 1764-1772.
- [2] Dragi evi T, Guerrero J M, Vasquez J C, et al. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29 (2): 695-706.
- [3] Lie Xu, Dong Chen. Control and operation of a DC microgrid with variable generation and energy storage [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26 (4): 2513-2522.
- [4] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (19): 100-107.
- [5] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等. 直流微网研究中的关键技术 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (1): 98-106.
- [6] 石庆均, 江全元. 包含蓄电池储能的微电网实时能量优化调度 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33 (5): 76-82.
- [7] 文波, 秦文萍, 韩肖清, 等. 基于电压下垂法的直流微电网混合储能系统控制策略 [J]. 电网技术, 2015, 39 (4): 892-899.
- [8] 吴红斌, 顾细, 赵波清, 等. 蓄电池充放电管理的全过程仿真研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28 (8): 843-849.
- [9] Hongmei Zeng, Qiang Yang. Adaptive voltage regulation of islanding DC microgrid with multiple distributed PVs and storage units [C]. 27th Chinese Control and Decision Conference, 2015: 5528-5533.
- [10] 郑永伟, 陈民铀, 李闯, 等. 自适应调节下垂系数的微电网控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (7): 6-11.
- (收稿日期: 2016-11-21) **EA**