

超级 UPS 中光伏发电单元的功率调控

刘翌煜, 李海津, 胡长生, 陈 敏, 徐德鸿

(浙江大学电气工程学院, 杭州 310027)

摘要: 超级 UPS 包含电网、燃气发电机、电池以及光伏等多种类型能源, 是一种具有很高供电可靠性的电源系统。在这样的多能源储能系统中, 光伏发电单元需要配合其他多种能源, 在保证稳定性的前提下, 通过不同模式的灵活切换, 提高其电能利用率。针对超级 UPS 特点及其工作模式, 讨论了光伏单元的功率调控, 并针对此应用场合优化了传统的光伏最大功率点跟踪算法, 最后在 30 kW 的平台上进行了初步验证。改进后的算法, 可以在保证收敛性和跟踪精度的条件下, 有效加快光伏最大功率点跟踪速度。

关键词: 光伏发电单元; 超级 UPS; 最大功率点跟踪 MPPT

Power Regulation of PV Power Generation Unit Applied in Super UPS

LIU Zhaoyu, LI Haijin, HU Changsheng, CHEN Min, XU Dehong

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Super UPS is an energy storage system composed of many energy sources, such as grid, gas turbine, and photovoltaic(PV) etc, which can provide higher surety electricity power than traditional UPS. In such a multi-energy storage system, the photovoltaic power generation unit needs to coordinate a variety of other energy sources, and uses flexible switching different modes to maximize their energy efficiency on the premise of the stability. This paper analyzes the characteristics of super UPS and the operating mode of PV unit, discusses the power regulation of PV unit, and improves the traditional maximum power point tracking(MPPT) strategy of PV to be applied in such applications. Finally, the control method is verified on an experimental platform preliminarily. The improved control method can effectively accelerate the maximum power tracking speed of the PV under the condition of ensuring convergence and the same tracking accuracy.

Keywords: PV power generation unit; super UPS; maximum power point tracking(MPPT)

随着社会经济的发展, 特别是网络经济的发展, 数据中心、交通枢纽、核电站和医院等场合对供电可靠性的要求越来越高。超级 UPS^[1]是一种包含电网、燃气发电机、电池^[2]以及光伏等多种类型能源的电源系统, 具有很高的供电可靠性。其中光伏由于输出功率的波动性和随机性, 如何使光伏单元适用超级 UPS 需求和特点, 设计合理功率调控, 以提

高其捕获的能量是一个值得探讨的问题。

文献[3]介绍了一种带储能的独立光伏系统控制方法, 提出了限定功率点跟踪 LPPT(limited power point tracking)的控制方法。超级 UPS 中光伏发电单元需要配合其他多种能源, 在保证系统稳定性的前提下, 通过在最大功率点跟踪 MPPT(maximum power point tracking)模式和 LPPT 模式下灵活切换, 尽可能地使用光伏发电单元捕获的能量。为了减少能量损失, 尤其是减少模式切换时的能量损失, 光伏单元需要进行准确而快速的最大功率点跟踪。文献[4]介绍了几种常用的光伏阵列最大功率点跟踪算法, 并分析了它们的优势与缺陷。常规的定步长

收稿日期: 2016-02-01

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA053603)

Project Supported by National High Technology Research and Development Program(863 Program)of China(2012AA053603)

算法扰动步长均为定值,要获得更快的跟踪速度需要增大扰动步长,便会在 MPPT 点附近造成更大的电压摆动,导致更多能量损失。

本文针对超级 UPS 特点及其工作模式,讨论光伏单元的功率调控。重点讨论了变步长最大功率点跟踪算法步长的设计问题,以提高最大功率点跟踪速度和捕获的能量,最后进行了初步实验验证。

1 光伏发电单元的工作模式

由于光伏输出具有波动性和随机性,将光伏发电单元接入超级 UPS,需要对光伏发电单元进行能量管理。

图 1 为光伏发电单元接入超级 UPS 的示意。光伏发电单元具备 2 种工作模式:①MPPT 模式:光伏发电单元输出功率小于系统给出的指令功率,光伏单元处于最大功率工作模式;②LPPT 模式:当光伏发电单元输出功率大于系统给出的指令功率,光伏单元的输出功率限定为指令功率。

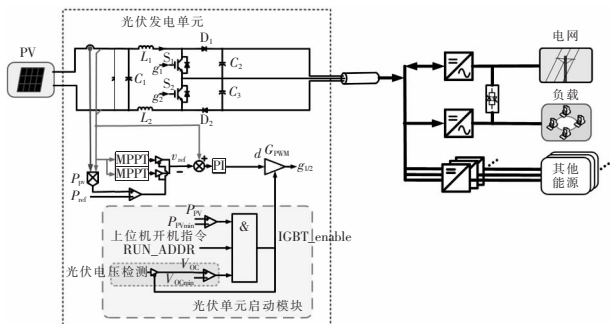


图 1 光伏发电单元接入超级 UPS 示意

Fig.1 Sketch map of PV power generation unit connected to super UPS

当电网正常时,光伏单元持续工作在 MPPT 模式下,多余负载的能量将用于给储能单元充电或者回馈电网。图 2 为电网故障时光伏单元在两种模式的切换过程,图中, P_{MPPT} 为光伏当前最大输出功率, P_{PV} 为光伏单元实际输出功率, P_{ref} 为光伏输出功率指令。由图可以看到,光伏单元的工作模式会受到系统功率指令的影响。当电网故障时,若光伏功率小于负载功率,光伏单元工作在 MPPT 模式;若光伏功率大于负载功率且储能单元已经充满,光伏单

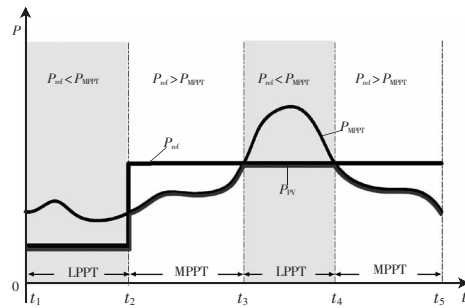


图 2 光伏单元 MPPT/LPPT 模式切换过程

Fig.2 Switch process between the MPPT and LPPT modes

元将工作在 LPPT 模式,使光伏在两种模式中切换。

2 光伏发电单元的最大功率点跟踪

扰动观测法^[5,6]和电导增量法^[7]是两种常用的最大功率点跟踪算法,这两种算法一般均采用定步长的跟踪方式,而定步长的跟踪方式无法兼顾快速性和 MPPT 跟踪精度的矛盾。因此变步长的 MPPT 算法受到了关注。

变步长电导增量法^[8]的电压迭代公式为

$$\begin{cases} \Delta U_k = A P'(U_k) \approx A \frac{P(U_k) - P(U_{k-1})}{U_k - U_{k-1}} \\ U_{k+1} = U_k + \Delta U_k \end{cases} \quad (1)$$

式中: A 为正的常系数; U_k 为 k 时刻的光伏电压; U_{k+1} 为 $k+1$ 时刻的光伏电压; ΔU_k 为 $k+1$ 时刻的步长; $P'(U_k)$ 为光伏 $P-U$ 曲线在 U_k 点的导数。式(1)表明步长除依赖于光伏 $P-U$ 曲线的斜率外,还依赖系数 A 。 A 值越大,步长越大,跟踪速度越快,但若 A 值过大,则会影响算法的收敛性。

图 3 为系数 A 取不同值时,光伏单元最大功率点跟踪(MPPT)过程的仿真波形,图中光伏阵列的最大输出功率 $P_m=15 \text{ kW}$,最大功率点电压 $U_m=495 \text{ V}$,初始电压 $U_0=150 \text{ V}$ 。由图可以看到,随着 A 值增大,跟踪加快的同时,在最大功率点 U_m 附近逐渐出现了振荡的情况。为了最佳跟踪,步长系数 A 选取方式应保证算法尽快达到最大功率,并在最大功率点附近具有小的波动。

对于 A 的取值来说,收敛时无超调和有超调的

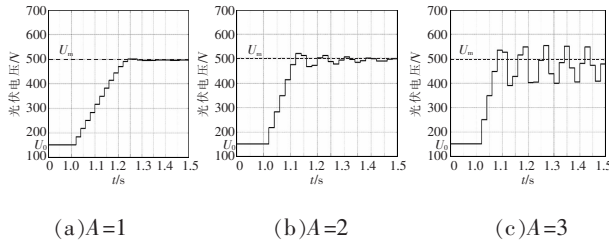


图 3 不同系数情况下光伏电压切换波形

Fig.3 Waveforms of PV voltage with different coefficient when the mode is changed

条件是不同的。无超调收敛情况下光伏电压跟踪示意如图 4 所示。从图 4 中可以看到,对于无超调收敛,要求如下:

$$|\Delta U_k| \leq |U_m - U_k| \quad (2)$$

将式(1)中的 ΔU_k 代入式(2),可得无超调收敛步长系数 A 的上限收敛系数 $a(U_k)$,即

$$A \leq a(U_k) = \left| \frac{U_m - U_k}{P'(U_k)} \right| \quad (3)$$

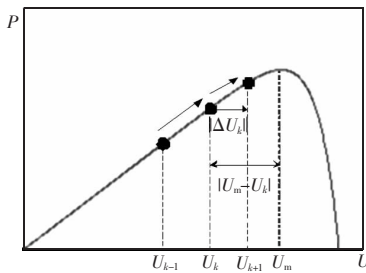


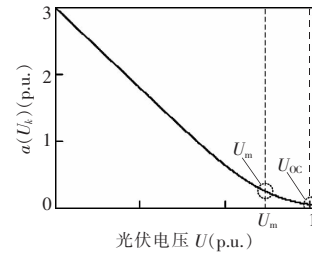
图 4 无超调收敛情况下光伏电压跟踪示意

Fig.4 Schematic diagram of MPPT without overshoot

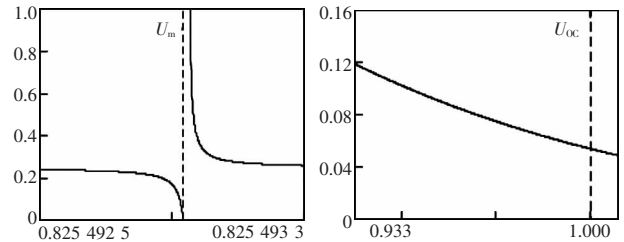
图 5 为无超调收敛步长上限系数 $a(U_k)$ 与 U_k 之间的关系。由图 5 可见, $a(U_k)$ 是一个非连续函数,在 $U=U_m$ 点断续,且在 U_m 一个极小的邻域内,其值有突变。

假定光伏电压 U_k 在最大功率点电压 U_m 左侧或右侧时,均可以采用式(3)来计算步长系数。但是,当光伏电压 U_k 趋近于最大功率点电压 U_m 时,步长系数 $a(U_k)$ 的值不确定,无法采用式(3)进行计算,故当 U_k 在 U_m 的某邻域内时,可选择定步长跟踪方法。

根据以上分析,将水平电压区间分成 3 个区间:区域 1 ($0, U_{b1}$), 区域 2 [U_{b1}, U_{b2}] 和区域 3 (U_{b2}, U_{oc}),如图 6 所示。其中,区间区域 2 是最大功率点



(a) $a(U_k)$ 函数

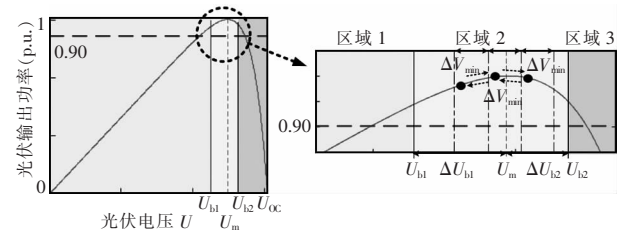


(b) U_m 处放大

(c) U_{oc} 处放大

图 5 $a(U_k)$ 函数曲线

Fig.5 Curves of function $a(U_k)$



(a) 分段示意

(b) 区域 2 放大

图 6 改进的变步长算法电压分段示意

Fig.6 Schematic diagram of segmented voltage of improved variable step algorithm

U_m 的邻域,采用定步长方法,该定步长跟踪算法和传统的定步长扰动观察法的控制方法^[4]一致,步长 ΔV_{min} 的选取既要能满足稳态点的 MPPT 跟踪精度要求,又要防止采样等误差造成的误判问题;区域 1 和区域 3 采用变步长跟踪算法,步长系数分别为 A_1 和 A_3 。从图 5 中可以看到,步长系数 $a(U_k)$ 在区域 1 和 3 这两个区间内均为单调递减函数。则由式(3)可得

$$\begin{cases} A_1 \leq \min(a(U_k)|_{U_k \in (0, U_{b1})}) = a(U_{b1}) \\ A_3 \leq \min(a(U_k)|_{U_k \in (U_{b2}, U_{oc})}) = a(U_{oc}) \end{cases} \quad (4)$$

步长系数 A 增大可加快跟踪速度,因此, A 可取为满足式(4)的最大值,即

$$\begin{cases} A_1 = a(U_{b1}) \\ A_3 = a(U_{oc}) \end{cases} \quad (5)$$

讨论区域边界电压时, 区域边界 U_{b1} 、 U_{b2} 取值的关键在于始终保持区域 $[U_{b1}, U_{b2}]$ 为一个最大功率点 U_m 的相对位置和大小近似确定的邻域, 而不能因为 U_m 随光照等环境条件的改变而发生错误。如图 6 中, 区域 2 (U_m 邻域) 不宜过大, 原因是区域 2 内光伏电压扰动步长 ΔV_{\min} 较小, 跟踪速度慢。可以要求当光伏电压进入区域 2 后跟踪效率达到 90% 以上, 这样即使进入区域 2 以后跟踪速度变缓也对算法的总体跟踪速度影响不大, 即

$$\begin{cases} P(U_m - \Delta U_{b1}) > 0.9P_m \\ P(U_m + \Delta U_{b2}) > 0.9P_m \end{cases} \quad (6)$$

式中, ΔU_{b1} 、 ΔU_{b2} 分别为边界电压 U_{b1} 、 U_{b2} 到最大功率点电压 U_m 的距离。

另外, 区域 2 内定步长跟踪将会使光伏电压 U_k 在最大功率点电压 U_m 附近, 以步长 ΔV_{\min} 徘徊, 因此区域 2 也不宜过小, 至少应大于 U_k 在 U_m 附近的徘徊区间, 故有

$$\begin{cases} \Delta U_{b1} > 1.5\Delta V_{\min} \\ \Delta U_{b2} > 1.5\Delta V_{\min} \end{cases} \quad (7)$$

假定已知当前光伏板额定状态下的最大输出功率为 P_{me} , 最大功率点电压为 U_{me} , 开路电压 U_{oc} , 短路电流 I_{sc} 。结合光伏模型的工程计算方法^[8], 将其代入式(6)~式(7)可确定区域 2 的区间大小 ΔU_{b1} 和 ΔU_{b2} 。

跟踪当前状态下的 U_m 是 MPPT 算法控制的目标, 而 U_m 随当前环境条件的变化而变化。当 ΔU_{b1} 和 ΔU_{b2} 固定时, 边界电压 ΔU_{b1} 、 ΔU_{b2} 随 U_m 变化的情况如图 7 所示。

只能通过当前测量的已知量(如 U_k 、 I_k 、 U_{k-1} 、 I_{k-1}) 或者计算量来判断光伏电压 U_k 和最大功率点电压 U_m 的距离, 间接判断当前 U_k 是否已经进入区域 2。根据光伏阵列模型^[7], 对于固定的光伏曲线, 有

$$I(U) = I_{sc} - I_{D0}(e^{\lambda U} - 1) \quad (8)$$

式中: $I(U)$ 为光伏电流; U 为光伏电压; $P(U)$ 为光伏功率; I_{D0} 为光伏电池在无光照时的饱和电流; λ 为不考虑温度变化时的常数因子。则光伏功率斜率为

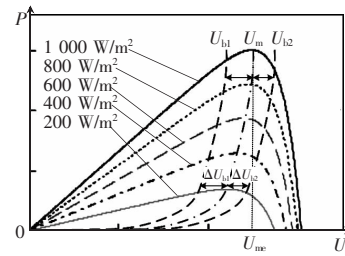


图 7 环境条件对边界电压 U_{b1} 、 U_{b2} 的影响

Fig.7 Effect of environmental conditions on boundary voltage U_{b1} and U_{b2}

$$P'(U) = \frac{d(UI(U))}{dU} = I(U) + U \frac{dI(U)}{dU} \quad (9)$$

在最大功率点 U_m 处, 有 $P'(U)=0$, 光伏功率斜率 $P'(U)$ 的大小可以反映目前光伏电压 U 与 U_m 之间的距离。由式(9)可知, 斜率 $P'(U)$ 不仅和当前工作电压 U 有关, 还和此时的光伏电流有关。根据式(8), 光照强度对光伏电流影响很大。如果用 $P'(U)$ 和某一固定阈值进行比较来判断 U 和 U_m 的距离, 则光照强度不同时, 此阈值会有很大偏差。因此, 可以考虑用判据 $\frac{P'(U)}{I(U)}$ 来判断光伏电压 U 和 U_m 的相对距离 ΔU , 从而排除不同光照强度等的干扰。

图 8 为某光伏阵列在不同光照下此判据与光伏电压 U 到最大功率点电压 U_m 距离 ΔU 的关系, $\Delta U = U_m - U$ 。图中, 光伏阵列参数: $U_{me}=500$ V, $U_{oc}=605$ V, $P_{me}=15$ kW。由图可以看到, 此判据的大小可以大致反映 U 到 U_m 的距离, 光照条件的变化对其影响很小。因此, 可以认为当 $B_2 < \frac{P'(U_k)}{I_k} < B_1$ (B_1 、 B_2 为固定阈值) 时, 有 $U_k \in (U_{b1}, U_{b2})$ 结合由式(6)~式(7)确定出 ΔU_{b1} 、 ΔU_{b2} 区域大小, B_1 、 B_2 可表示为

$$\begin{cases} B_1 = \frac{P'(U_{me} - \Delta U_{b1})}{I(U_{me} - \Delta U_{b1})} \\ B_2 = \frac{P'(U_{me} + \Delta U_{b2})}{I(U_{me} + \Delta U_{b2})} \end{cases} \quad (10)$$

综上所述, 改进变步长 MPPT 算法中所牵涉到的参数 A_1 、 A_3 、 B_1 、 B_2 等均可以由式(3)、式(5)、式(6)、式(7)和式(10)设计。根据改进变步长 MPPT 算法思路, 超级 UPS 中光伏发电模块的 MPPT 算法流程如图 9 所示。

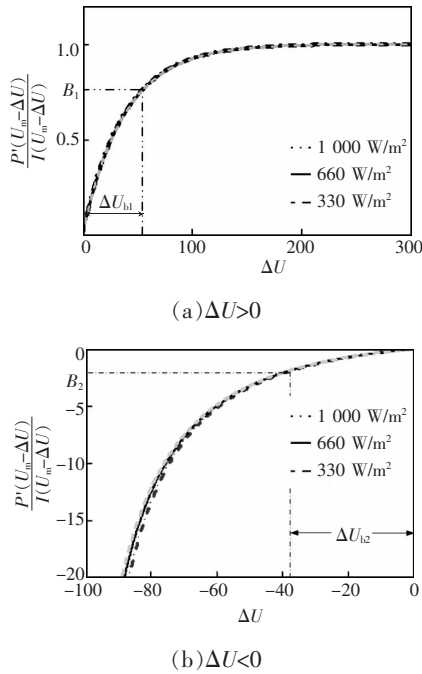


图 8 不同光照下判据 $\frac{P'(U)}{I(U)}$ 与 ΔU 的关系函数

Fig.8 Relationship between $\frac{P'(U)}{I(U)}$ and ΔU under different lighting condition

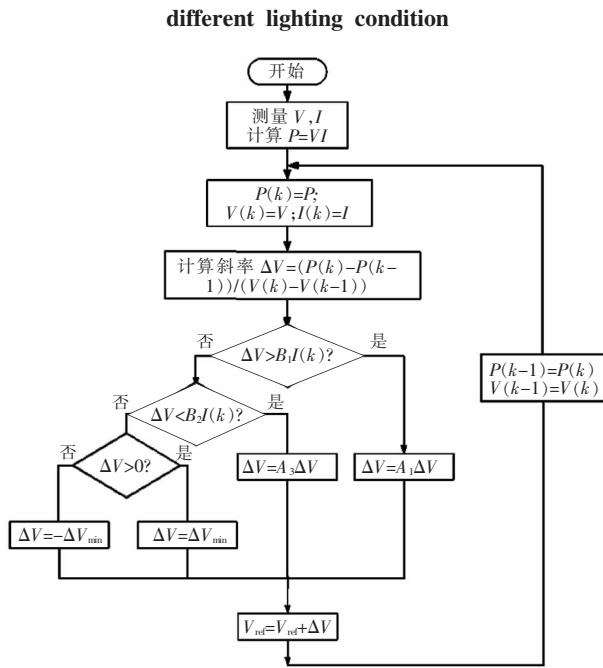


图 9 改进的变步长算法流程

Fig.9 Flow chart of improved variable step algorithm

3 实验

为了验证上述改进变步长 MPPT 法在光伏发

电单元模式切换时的有效性,利用超级 UPS 实验平台进行实验验证。光伏单元为 30 kW 三电平 boost 单向 DC 模块,DC/DC 主电路参数如表 1 所示。

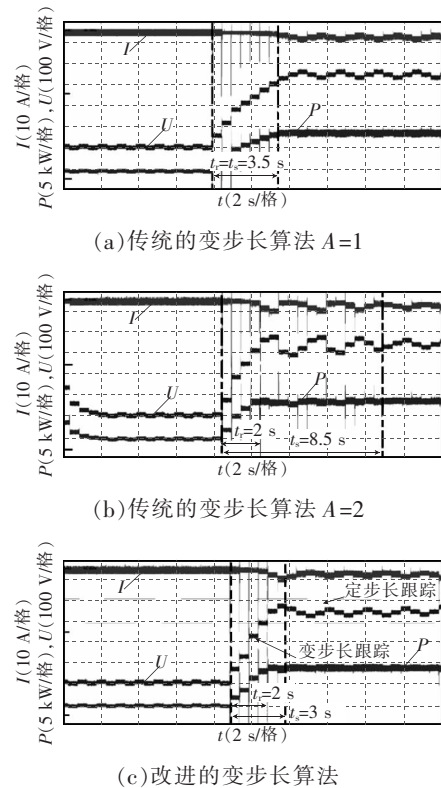
表 1 DC/DC 变换器参数

Tab.1 Parameters of DC/DC

$C_{s1,2}, C_{l1,2}/\mu\text{F}$	$L_{s1,2}/\text{mH}$	f_s/kHz	V_{bss}/V
800	0.38	10	750

输入源采用 Chroma 62150H-1000S 程控直流电源,具备太阳能电池仿真功能。光伏模拟源输入开路电压 $U_{\text{oc}}=605\text{ V}$,MPPT 点功率 $P_m=15\text{ kW}$,最大功率点电压 $U_m=500\text{ V}$,MPPT 精度要求 99%以上。根据以上参数并结合变换器采样精度,可令区域 2 步长 $\Delta V_{\text{min}}=15\text{ V}$ 。将以上参数代入式(6)、式(7),计算可得区域 2 大小 $\Delta U_{\text{b1}}=50\text{ V}, \Delta U_{\text{b2}}=40\text{ V}$ 。再由式(8)计算出阈值 $B_1=0.75, B_2=-2$,由式(3)、式(5)得到步长系数 $A_1=2, A_3=0.2$ 。

图 10 为光伏单元从 LPPT 模式切换到 MPPT 模式时改进变步长算法和传统算法的实验波形对比。



(c)改进的变步长算法

图 10 改进变步长算法与传统变步长算法对比实验波形

Fig.10 Waveforms of improved variable step algorithm in comparison with traditional variable step algorithm

由图 10 可以看到,改进的变步长 MPPT 跟踪方法可改进传统的变步长算法中由于步长系数 A 不易选取,如 A 过小则无法体现变步长跟踪速度快的优势, A 过大则容易在最大功率点附近产生振荡的情况。图 10(a)、(b)均采用传统变步长跟踪算法,图 10(b)中步长系数 A 比图 9(a)中的大,其图 10(b) 光伏 MPPT 的电压上升时间 t_r 小于图 10(a) 中。由于步长系数 A 较大,尽管上升时间 t_r 小,但还是引起了小幅度振荡,整体的调节时间 t_s 长于图 10(a)。由图 10(c)可见,在光伏电压 U_k 远离 U_m 的区域,采用变步长跟踪保证了和图 10(b)一样快的电压上升时间,同时在靠近 U_m 的区域选取了定步长跟踪,保证了和图 10(a)同样好的收敛性,总体性能明显优于传统的变步长跟踪算法。

4 结语

本文探讨了光伏单元接入超级 UPS 的意义及工作模式。超级 UPS 中的光伏发电单元需要配合其他储能单元,在 MPPT 和 LPPT 模式下进行灵活切换,实现对电能的储存和控制。针对此种场合,从加快功率跟踪速度的角度对传统的 MPPT 算法进行了优化,改进后的变步长 MPPT 控制算法可以在保证收敛性和 MPPT 跟踪精度的条件下,有效加快功率的跟踪速度。

参考文献:

- [1] Li Haijin, Zhang Wenping, Xu Dehong. High-reliability long-backup-time super UPS with multiple energy sources [C]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2013: 4926-4933.
- [2] 周佳男, 陈敏, 李海津, 等. 超级 UPS 中锂电池功率变换单元设计[J]. 电源学报, 2015, 13(3):21-27.
Zhou Jianan, Chen Min, Li Haijin, et al. Design of Li-ion battery power conversion system applied in super UPS[J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(3):21-27(in Chinese).
- [3] 李建, 胡长生, 刘墨煜, 等. 一种带储能的光伏发电 DC/DC 变换器控制方法[J]. 电力电子技术, 2014, 48(6):29-31.
Li Jian, Hu Changsheng, Liu Zhaoyu, et al. A novel con-

trol method of DC/DC in PV system with energy storage[J]. Power Electronics, 2014, 48(6):29-31(in Chinese).

- [4] 周林, 武剑, 栗秋华, 等. 光伏阵列最大跟踪控制方法综述[J]. 高电压技术, 2008, 34(6):1145-1154.
Zhou Lin, Wu Jian, Li Qiu Hua, et al. Survey of maximum power point tracking techniques for photovoltaic array[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6):1145-1154(in Chinese).
- [5] Femia N, Petrone G, Spagnuolo G, et al. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(4):963-973.
- [6] Altas I H, Sharaf A M. A novel on-line MPP search algorithm for PV arrays[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11(4):748-754.
- [7] Hussein K H, Muta I, Hoshino T, et al. Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions[J]. IEE Proceedings: Generation, Mission and Distribution, 1995, 142(1):59-64.
- [8] 张兴, 曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 5 版. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [9] Mutoh N, Matuo T, Okada K, et al. Prediction data based maximum power point tracking method for photovoltaic power generation systems[C]. Power Electronics Specialists Conference PESC02. 2002 IEEE 3rd Annual, 2002, 3:1489-1494.



刘墨煜

作者简介:

刘墨煜(1990-),女,硕士研究生,研究方向:新能源和 DC/DC,E-mail:liuzhaoyu@zju.edu.cn。

李海津(1988-),男,博士,研究方向:电力电子与新能源技术,E-mail:Lihaijin@zju.edu.cn。

胡长生(1970-),男,博士,副教授,研究方向:电力电子技术与新能源应用技术,E-mail:hucs@zju.edu.cn。

陈敏(1976-),男,博士,副教授,研究方向:高功率变换技术和高频感应送电技术电能质量控制技术,E-mail:heaven@zju.edu.cn。

徐德鸿(1961-),男,通信作者,博士,教授,研究方向:电力电子技术、新能源发电功率变换系统及控制、高密度电源,E-mail:xdh@zju.edu.cn。