

风光储出力波动抑制策略

王飞林,崔双喜,杜玉婵,刘星

(新疆大学 电气工程学院,新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要:针对风光互补后出力波动性影响并网安全的问题,提出一种基于自适应噪声的完整集成经验模态分解(CEEMDAN)的混合储能平抑功率波动的方法。首先,采用CEEMDAN算法进行多尺度分解风光输出功率信号,将低频信号进行并网处理,次高频和高频功率信号由储能装置进行吸收平抑。其次,提出一种基于模糊控制的储能装置平抑功率再分配的控制策略,实现对蓄电池和超级电容平抑功率的合理分配,防止储能装置的过充电和过放电,达到储能装置安全运行的目标。最后,仿真结果证明了该控制策略的有效性,该控制策略能够实现风光互补后平滑并网的目标。

关键词:功率波动抑制;模糊控制;协调控制;自适应噪声的完整集成经验模态分解

中图分类号:TM732 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed19535

Fluctuation Suppression Strategy of Scenery Storage Output

WANG Feilin, CUI Shuangxi, DU Yuchan, LIU Xing

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang, China)

Abstract: In view of the scenery complementary output volatility after grid security, a complete integration hybrid energy storage method of smooth power fluctuations based on complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) was put forward. Firstly, CEEMDAN algorithm was used to decompose the power output signal of the scenery with multi-scale, the low frequency signal was processed with grid-connected in parallel, the subhigh frequency and high frequency power signals were absorbed and suppressed by the energy storage devices. Secondly, the control strategy with a kind of energy storage device based on fuzzy control for slowing redistribution of power was put forward, the reasonable distribution for the balancing power of the storage battery and the supercapacitor was implemented, over charging and over discharging of energy storage device were prevented, the goal of safe operation for energy storage device was achieved. Finally, the simulation results show the effectiveness of the proposed control strategy, which can achieve the goal of smooth interconnection after scenery complementary.

Key words: power fluctuation suppression; fuzzy control; coordinated control; complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise(CEEMDAN)

在我国许多偏远地区,风力资源和光伏资源非常丰富。但是风力发电和光伏发电具有间歇性和波动性的缺点,这对新能源并网产生不利影响。目前,我国新能源发电中弃风弃光现象严重,为了提高风力发电和光伏发电的并网能力,利用储能技术平抑新能源出力波动是当前的重要选择。

国内外对利用储能技术平抑新能源出力波动早有研究,也取得了一定的研究成果。文献[1]

提出利用自适应小波包分解和混合储能的方法平抑风电场输出功率波动。该方法实现对储能功率的分配,但是没有考虑到储能装置对充放电功率的限制。文献[2-4]针对间歇性电源输出功率波动大、随机性强的特点,提出利用超级电容和蓄电池进行混合储能平抑功率波动的控制方法,平抑效果较好,但其控制结构稍显复杂。文献[5]提出了一种基于模糊聚类经验模态分解的控制策略,其研究方法较好但是没有考虑到蓄电池

基金项目:新疆大学自然科学基金(BS160246)

作者简介:王飞林(1992—),男,硕士,工程师,Email:1678704818@qq.com

充放电安全的局限性。文献[6]提出利用CEEM-DAN方法分解输入信号的方法,但是其没有考虑到风光发电出力曲线的特殊性。文献[7]提出利用储能平抑风力发电出力波动的方法,但是其没有考虑到充放电的次数对储能装置运行安全的影响。文献[8-12]根据新能源出力的缺点,提出利用蓄电池平抑出力波动的方法。其利用对波动功率的分配或分频后用蓄电池吸收消纳,但是没有考虑频繁的充放电对蓄电池使用寿命的不利影响。

本文在总结前人研究成果的基础上,提出基于CEEMDAN分解的混合储能平抑风光出力波动的控制方法。首先,利用CEEMDAN分解风光输出功率,得到不同频率的功率信号,低频信号波动平滑直接用来并网,次高频功率信号利用蓄电池进行吸收平抑,高频功率信号利用超级电容进行吸收平抑。其次,为了降低频繁充放电对蓄电池使用寿命的不利影响,利用蓄电池的SOC和超级电容SOC作为模糊输入量,利用模糊控制实现对平抑功率的再分配,实现对混合储能平抑功率的协调控制。最后,仿真结果证明了该控制方法的有效性。

1 功率信号的经验模态分解

本文根据某风光互补并网电场实际运行部分数据,采样时间为1 h,对该数据进行快速傅里叶变换得到幅频特性曲线,如图1所示。

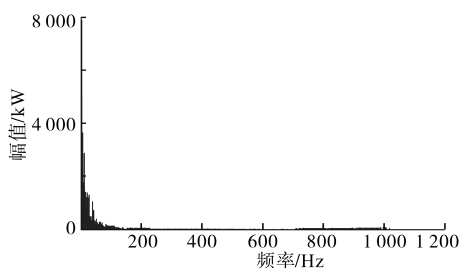


图1 幅频特性曲线

Fig.1 The amplitude—frequency characteristic curve

由图1可知,风力发电和光伏发电互补后输出的功率主要集中在低频区间,高频区间的功率相对较小。在新能源并网时,低频分量对并网的影响相对较小,对并网影响较大的是高频分量。为了尽可能降低功率波动对并网的影响,利用频域理论对风光输出功率信号进行重构,以保证风光输出功率在时域呈现更加平滑的状态。所以本文利用储能的方法对高频

功率波动和低频功率波动进行抑制。采用超级电容存储和平抑高频功率信号,采用蓄电池存储和平抑低频信号,两者实现协调控制,既满足了风光互补并网的需要,又能保证储能系统的优化运行。把新能源输出功率分解为低频信号和高频信号的方法有许多种,分解功率信号的质量将影响后续储能平抑的效果,本文采取改进经验模态分解(EMD)的方法即CEEMDAN方法将输出功率信号分解成高频信号和低频信号。

1.1 经验模态分解(EMD)的基本原理

EMD是把繁杂的原始输入信号分化成一定的本征函数(intrinsic mode function, IMF),它的核心思想是将1个频率复杂的信号波转化分解为多个单一频率信号波和残波的组合,分解出来的各个分量包含原始信号的不同时间尺度的局部特性。本征模函数的瞬时频率都是有意义的,1个本征函数满足2个要求:一是在整个时域范围内,函数局部极值点及过零点的数目大多数情况下是一样的,或最多相差不超过1个;二是在时间范围内任何一个时刻点,输入信号的局部最小值与最大值共同定义的包络平均值为零。另外,IMF的分解需要以下相关条件:

- 1)信号至少有1个极小值和1个极大值;
- 2)极值间的时间间隔决定信号特征时间尺度;
- 3)如果数据中缺乏极值点,但存在缺陷点,可通过微分、分解、再积分的方法获得IMF。

根据IMF的分解条件,EMD具体分解过程如下:

1)找出输入信号的极大值和极小值点,然后根据极大值点采取3次样条插值函数拟合形成原数据的上包络线,根据极小值点采取三次样条插值函数拟合形成原数据的下包络线,最终上下包络线能够包含信号的全部数据。

2)计算两条包络线平均值 $m_1(t)$ 和原始信号 $x(t)$ 的差值 $x_1(t)$:

$$m_1(t) = \frac{e_{up}(t) + e_{low}(t)}{2} \quad (1)$$

$$x_1(t) = x(t) - m_1(t) \quad (2)$$

式中: $e_{up}(t)$ 为上包络线; $e_{low}(t)$ 为下包络线。

在这个过程中要始终判断均值是否满足IMF的2个条件,如果其满足要求则记为 $c_1(t)$ 并选作第1个IMF,如果不满足要求则继续当做原

始信号,继续重复过程1)和过程2),直到得出数据满足要求为止。

3)计算剩余信号 $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$ 。这个过程实际上是把剩余信号重新当做原始信号处理,重复过程1)和过程2),直至完成所有的数据分解。原始输入信号最终会被分解成多个本征函数和和剩余残波 $r_n(t)$:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (3)$$

式中: $c_i(t)$ 为第 i 个 IMF。

1.2 CEEMDAN方法对EMD的改进

EMD存在不足之处,主要是原始信号出现跃变时,信号不均匀的极值点会导致得不到适宜的IMF,最终出现模态混叠现象。

CEEMDAN是采用噪声辅助数据分析方法,其利用加入的可以自适应白噪声,实现将不同时间尺度的原始输入信号重新分布到适宜的参考值上,紧接着通过相应的分解,计算其相应的余量来获取相应的IMF分量。这样经过多次的对噪声取平均值,噪声会逐渐消失,最终显著减少模态混叠现象的出现。

CEEMDAN过程如下:

1)向原始输入信号中加入自适应白噪声 $\varepsilon v^i(t)$,通过EMD获取第1个本征函数 $d_1(t)$ 并计算余量信号 $r_1(t)$:

$$d_1(t) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I c_1^i(t) \quad (4)$$

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t) \quad (5)$$

式中: I 为实验次数。

2)进行 i 次实验,对加入自适应白噪声的原始输入信号进行分解,直到得到第1个EMD模态分量为止,计算第2个模态分量如下:

$$d_2(t) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I E_1 \{ r_1(t) + \varepsilon E_1[v^i(t)] \} \quad (6)$$

3)重复过程2),得到第 $k+1$ 个模态分量:

$$r_k(t) = r_{k-1}(t) - d_k(t) \quad (7)$$

$$d_{k+1}(t) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I E_1 \{ r_k(t) + \varepsilon E_k[v^i(t)] \} \quad (8)$$

式中: $E_k()$ 为对信号数据进行分解操作的第 k 个IMF分量。

4)根据过程3),原始信号序列 $x(t)$ 最终被分解为

$$x(t) = \sum_{k=1}^K d_k(t) + R_k(t) \quad (9)$$

式中: $R_k(t)$ 为不能再分解时的余量信号; K 为模

态分量的数量。

1.3 功率信号的CEEMDAN分解

CEEMDAN方法在处理非平稳及非线性数据方面,具有明显的优势。图2为某风光互补电场的功率出力数据曲线,数据采样时间为1h。

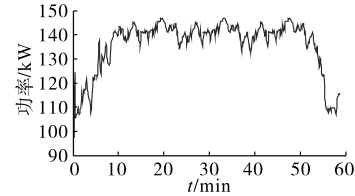


图2 风光出力曲线

Fig. 2 Curve of scenery output

图3为采用CEEMDAN方法对原始的风光输出功率数据 ECG_1 进行分解,得到的功率曲线分解图。从图3中可以得知,阶数越低,IMF分量含有的瞬时高频分量越多,第1阶则由最高瞬时频率成分组成,第10阶则IMF分量只有最低瞬时频率成分。

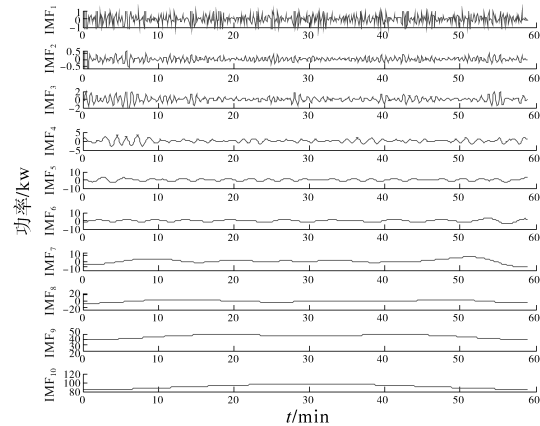


图3 功率曲线分解图

Fig. 3 Decomposition diagram of power curves

2 混合储能控制策略

经过CEEMDAN滤波处理,可以将风光输出功率曲线分解,最终输出为不同频率的信号。由信号分解图可以得知,分解后的功率信号分为低频、次高频和低频信号,从第1阶至第10阶频率逐渐降低,同理,分量的幅值随着IMF阶数增加而增加。低频功率信号可以直接并网,如果把 K 阶IMF作为次高频和低频的临界点, m 为分解后的阶数,把1~ K 阶IMF作为高频分量由超级电容吸收, $K \sim (m-2)$ 阶IMF作为次高频分量由蓄电池吸收。1~ K 阶IMF的分量和为

$$\mu(i) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n \text{IMF}(K)(i) \quad (10)$$

$K \sim (m-2)$ 阶IMF分量和为

$$\mu(i) = \sum_{k=1}^{m-2} \sum_{i=1}^n \text{IMF}(K)(i) \quad (11)$$

由于 K 阶IMF的选取对平滑效果产生很大的影响,所以需要对储能装置功率再分配。本文提出利用模糊控制的方法,调节超级电容和蓄电池的平抑分量,实现功率分配,维持储能系统运行安全,系统控制图如图4所示。

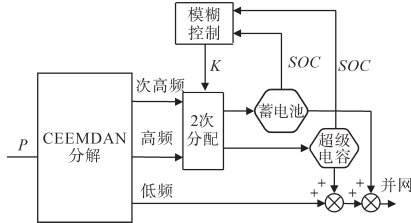


图4 系统控制图

Fig. 4 The chart of the system control

由图4可知,风光输出功率经过CEEMDAN分解后,次高频功率信号和高频功率信号进入功率分配控制层,功率分配的目的在于将目标平抑功率在超级电容和蓄电池之间进行合理再分配。为防止蓄电池因频繁过快的充放电造成损坏,功率分配层首先对超级电容的平抑功率进行调节,保证其 SOC 在正常范围之内,并且能够尽可能实现承担平抑高频波动的任务。本文采用模糊控制策略进行平抑功率再分配。在模糊控制分配器中,由蓄电池和超级电容共同决定 K 的大小,在1个控制过程中,分别经蓄电池当前 SOC 和超级电容 SOC 当做模糊控制器的输入。然后依照各储能 SOC 的大小来调节 K 的大小。当 K 接近于0时,说明超级电容 SOC 已经足够大,无法再承担过多的平抑任务,需要把平抑的功率任务分担给蓄电池完成。当 K 接近于 m 时,说明超级电容 SOC 已经比较小,可以承担过多的平抑任务,需要额外补充平抑功率,可以降低给蓄电池平抑功率的任务量。

2.1 模糊控制器设计

模糊控制器是模糊控制核心,其输入端为蓄电池荷电状态和超级电容荷电状态,并根据这些参数寻找合适的滤波阶数,最终实现动态吸收不稳定功率信号,达到抑制功率波动的目标。

本文设计了2个输入1个输出的模糊控制器,2个输入端为蓄电池 SOC 和超级电容 SOC ,输出端为IMF阶数 K ,其模糊控制规则如图5所示。图5蓄电池 SOC 划分为低、较低、中等、较高、高5个状态,所以其模糊子集为 $\{VS, S, ZM, B, VB\}$,超

级电容 SOC 划分为低、较低、中等、较高、高5个状态,所以其模糊子集为 $\{VS, S, ZM, B, VB\}$ 。输出值为滤波阶数 K (IMF的分配系数)分为低、偏低、中、偏高、高5个状态,所以其模糊子集为 $\{NB, NS, ZR, PS, PB\}$,模糊控制规则如表1所示。

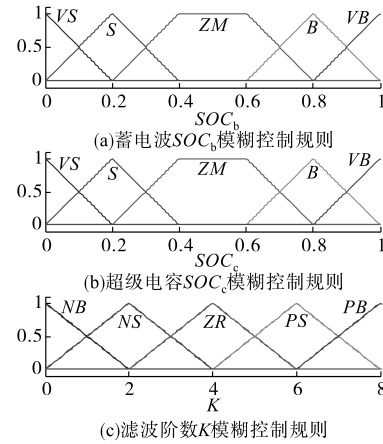


图5 模糊控制规则

Fig. 5 Fuzzy control rules

表1 模糊控制规则

Tab.1 The fuzzy control rules

SOC_b	SOC_c				
	VS	S	ZM	B	VB
VS	ZE	NB	NB	NB	NB
S	NS	ZR	NS	NB	NB
ZM	PS	PS	ZR	NS	NS
B	PB	PS	PS	ZR	PS
VB	PB	PB	PB	PS	ZR

取2条隶属函数和模糊规则的设计遵循以下原则:

1)如果输入 SOC_b 为 VB 且 SOC_c 为 VS ,则输出 K 为 PB ;

2)如果输入 SOC_b 为 VS 且 SOC_c 为 VB ,则输出 K 为 NB 。

规则1)表示,当蓄电池 $SOC > 80\%$,超级电容的 $SOC < 20\%$ 时,设置IMF分配系数 K 为高(PB),此时蓄电池降低功率吸收量,超级电容增加吸收功率;规则2)表示,当蓄电池 $SOC < 20\%$,超级电容的 $SOC > 80\%$ 时,设置IMF分配系数 K 为低(NB),此时超级电容降低功率吸收量,蓄电池增加吸收功率。

3 仿真与结果分析

本文以某装机容量为200 kW的风光互补电场某段时间实际运行数据为例,采样时间为60 min,采样间隔为 $\Delta t = 6$ s。混合储能系统所需配置容量

大小与 K 阶IMF的选取和平抑效果有关系,配置容量越大平抑效果越好经济性也就越差。本文尽可能在满足要求的基础上计算风光输出功率经过CEEMDAN分解后的累积值,以 IMF_4 作为混合储能容量配置分界本征函数,从而得到混合储能的容量,为了更好地进行功率再分配,蓄电池的额定功率/额定容量设为 $15\text{ kW}/1\ 000\text{ kW}\cdot\text{h}$,超级电容的额定功率/额定容量设为 $15\text{ kW}/500\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。使用Matlab软件进行仿真。

根据风光互补电场的数据,采用超级电容和蓄电池混合储能平抑和吸收风光输出功率曲线经过CEEMDAN分频后的高频信号,其功率平滑曲线如图6所示。

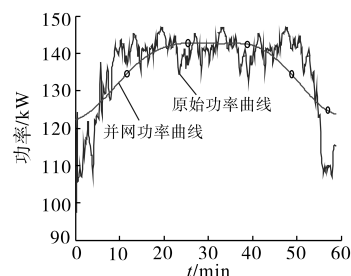


图6 平抑前后并网功率曲线

Fig. 6 Grid power curves before and after tame

由图6可知,风光功率曲线经混合储能平抑后输出功率曲线更加的平滑。

图7为超级电容SOC、蓄电池的SOC和滤波阶数 K 的变化曲线图;图8为未加入分配控制SOC变化图;图9为滤波阶数 $K=4$ 时蓄电池和超级电容吸收的功率曲线;图10为功率再分配后蓄电池和超级电容吸收的功率曲线。

由图10可知,经过模糊再分配,当超级电容的SOC过小,滤波阶数 K 增大,分配给超级电容吸收的功率会增加。当蓄电池的SOC过小,滤波阶数 K 减小,分配给蓄电池吸收的功率会增加。超级电容和蓄电池电池的SOC均处于其合理状态之内,避免了过充、过放。

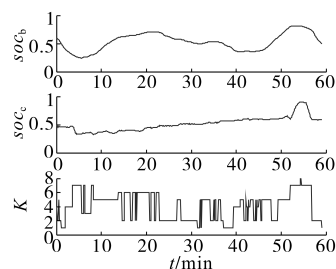


图7 SOC和滤波阶数 K 变化

Fig. 7 SOC and filtering order K variation

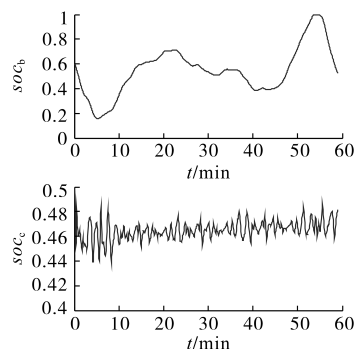


图8 未加入分配控制SOC变化图

Fig. 8 The SOC variation without distribution control

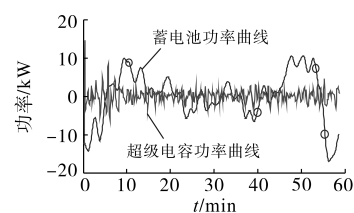


图9 未加入分配控制的功率曲线

Fig. 9 The power curves without distribution control

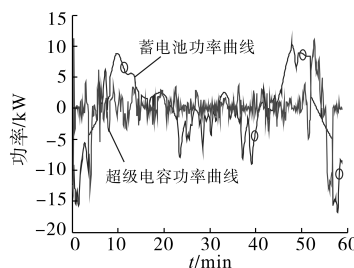


图10 再分配后混合储能的功率曲线

Fig. 10 The power curves with redistribution after hybrid energy storage

4 结论

本文提出一种基于CEEMDAN平抑风光输出功率波动的方法,利用CEEMDAN经验把功率信号分解成低频、次高频和低频信号。将低频信号分量作为并网功率,次高频分量由蓄电池吸收平抑,高频分量由超级电容吸收平抑,最终实现风光输出功率波动的抑制,实现安全并网。为了更好地实现平滑风光功率输出曲线的目标,同时保证超级电容和蓄电池的安全运行,分别将蓄电池SOC和超级电容作为安全限制条件,采用模糊控制的方法,实现对蓄电池和超级电容的平抑功率再分配,保证储能系统的安全运行,最终实现储能系统安全指标和波动抑制指标的协调控制。最后经过仿真,验证了本文提出方法的有效性,为后续进一步的研究创造条件。

参考文献

- [1] 吴杰,丁明.采用自适应小波包分解的混合储能平抑风电波动控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(3):7-12.
- [2] 罗智文,张新燕,李永东.一种混合储能微电网离并网控制技术[J].可再生能源,2017,35(1):50-55.
- [3] 高巧云,崔学深,张健,等.超级电容蓄电池混合储能直流系统工作特性研究[J].现代电力,2013,30(6):27-31.
- [4] 周福举,张宸宇,郑建勇,等.平抑间歇性电源功率波动的混合储能控制研究[J].电工电气,2014,10(10):11-14,27.
- [5] 杨锡运,曹超,任杰,等.利用储能系统平滑光伏波动的模糊聚类经验模态分解方法[J].高电压技术,2016,42(7):2127-2133.
- [6] 韩龙,谢子殿,王丽.滚动轴承声发射信号降噪的CEEM-DAN算法[J].黑龙江科技大学学报,2017,27(3):303-306.
- [7] 袁铁江,陈洁,刘沛汉,等.储能系统改善大规模风电场出力波动的策略[J].电力系统保护与控制,2014,42(4):47-53.
- [8] 郭云鹏,王小蕾,文福拴,等.用于平抑风电功率波动的电池储能系统控制策略[J].电力建设,2018,39(6):125-130.
- [9] 娄素华,吴耀武,崔艳昭,等.电池储能平抑短期风电功率波动运行策略[J].电力系统自动化,2014,38(2):17-22.
- [10] 戚永志,刘玉田.风光储联合系统输出功率滚动优化与实时控制[J].电工技术学报,2014,29(8):265-273.
- [11] 章竹耀,肖欣,郭晓丽,等.基于储能电池的光伏功率波动平抑策略[J].电力建设,2016,37(8):90-95.
- [12] Hasaranga W V H, Hemarathne R D T M, Mahawithana M D C P K, *et al.* A Fuzzy Logic Based Battery SOC Level Control Strategy for Smart Micro Grid[C]// International Conference on Advances in Electrical. Chennai, India: IEEE, 2017: 215-221.
- 收稿日期:2018-09-21
修改稿日期:2018-12-16
- *****
- (上接第46页)
- [9] 王挺,汤雨,何耀华,等.多单元开关电感/开关电容有源网络变换器[J].中国电机工程学报,2014,34(6):832-838.
- [10] 马圣全,潘庭龙,纪志成.新型开关电容双向DC-DC变换器设计[J].电气传动,2015,45(1):30-36.
- [11] Turhan M, Hendrix M A M, Duarte J L. Step-down Switched-capacitor Quasi-resonant PWM Converter with Continuous Conversion Ratio[C]//2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe). IEEE, 2015: 1-9.
- [12] Hu Y, Ioinovici A. High Step-up, High Power Density Boost Converter Integrated with Switched Capacitor-diode Cell[C]// 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), IEEE, 2015: 2255-2260.
- [13] Pradhan R, Subudhi B. Double Integral Sliding Mode MPPT Control of a Photovoltaic System[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(1): 285-292.
- [14] Kolluru V R, Sahu G, Mahapatra K, *et al.* Design and Simulation of a Modified Sliding Mode Controller Evaluated with a Conventional P&O MPPT Controller for Solar Applications [C]//2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES), IEEE, 2015: 1-5.
- [15] Montoya D G, Ramos-Paja C A, Giral R. Improved Design of Sliding-mode Controllers Based on the Requirements of MPPT Techniques[J]. IEEE transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 235-247.
- [16] Wu B, Li S, Smedley K M, *et al.* Analysis of High-power Switched-capacitor Converter Regulation Based on Charge-balance Transient-calculation Method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016,31(5): 3482-3494.
- [17] Gunasekaran D, Qin L, Karki U, *et al.* A Variable (n/m) X Switched Capacitor DC-DC Converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017,32(8): 6219-6235.
- [18] Wu B, Li S, Liu Y, *et al.* A New Hybrid Boosting Converter for Renewable Energy Applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016,31(2): 1203-1215.
- 收稿日期:2018-07-06
修改稿日期:2018-10-11