

基于改进 SOC 幂指数 下垂控制的混合储能能量均衡策略

张亦君, 李培强, 陈琦, 刘喜凤, 张仕鹏

(福建理工大学 电子电气与物理学院, 福建 福州 350118)

摘要: 为了抑制微电网电压波动、消纳不平衡功率, 针对直流微电网中的锂电池和超级电容混合储能系统, 提出一种改进 SOC 幂指数的下垂控制能量管理方法。该方法不仅改进了传统下垂控制电流均衡度差和会导致电压偏差的缺点, 还采用阻抗在线检测法量化线路电阻值, 消除了其对储能输出电流均衡度的影响, 并通过二次控制对下垂控制所引起的直流母线电压偏移进行补偿。基于 Matlab/Simulink 仿真平台搭建了光储直流微电网仿真系统模型, 检验了所搭直流微电网的电压稳定效果, 并验证了改进 SOC 幂指数下垂控制方法相对于传统下垂控制方法的优越性。

关键词: 直流微电网; 混合储能; SOC 幂指数下垂控制; 阻抗在线检测

中图分类号: TM7

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)03-0243-07

Energy balancing strategy for hybrid energy storage based on improved SOC power exponential droop control

ZHANG Yijun, LI Peiqiang, CHEN Qi, LIU Xifeng, ZHANG Shipeng

(School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to suppress the voltage fluctuation of microgrid and absorb unbalanced power, a droop control energy management method based on improved SOC power index is proposed for the hybrid energy storage system of lithium battery and super capacitor in DC microgrid. This method not only improves the shortcomings of poor current balance and voltage deviation caused by traditional droop control, but also uses online impedance detection method to quantify the line resistance value, eliminates its influence on the balance of energy storage output current, and compensates for the DC bus voltage offset caused by droop control through secondary control. Finally, a simulation system model of optical storage DC microgrid is constructed based on the Matlab/Simulink simulation platform, which tests the voltage stability effect of the DC microgrid, and verifies the superiority of the improved SOC power index droop control method over the traditional droop control method.

Keywords: DC microgrid; hybrid energy storage; SOC droop control; online impedance detection

近年来, 可再生能源正向着大规模、高比例、高质量、市场化的方向发展, 并且将在未来逐步建立起大规模集中发电与分布式发电有机结合的新能源格局^[1]。为了适应新能源发展方向、健全可再生能源质量优化、保证电力消纳, 目前广泛采用的工程策略是以直流微电网作为可再生能源的能量管理平台, 在系统中实现能量的实时就地平衡。

典型的直流微电网系统内可包含分布式电源、储能系统、直流负荷以及交直流变换系统^[2]。在当前储能系统的研究中, 由锂电池和超级电容储能设备构成的混合储能系统 (distributed hybrid energy storage system, DESS) 对提升储能系统的持久性和可靠性具有十分重要的意义和良好的发展前景, 在近几年的可再生能源并网中发挥了重要

收稿日期: 2023-10-13

第一作者简介: 张亦君 (1999—), 女, 山西太原人, 硕士研究生, 研究方向: 储能系统建模与辨识。

通信作者: 李培强 (1975—), 男, 山西忻州人, 教授, 博士, 研究方向: 电力系统运行与控制及负荷建模。

的作用。

基于优化理论的控制方法中下垂控制 (droop control) 目前已经得到广泛应用,其可以通过采集储能安装处的电气量信息实现自治管理,具有更高的冗余性,并且易于实现本地即插即用,方便快捷。文献[3]通过引入直流母线电压变化率来替代下垂控制中的电压,改善了负荷电流分配精度;文献[4]基于多个储能单元荷电状态均衡理论,提出的弱通信储能单元 SOC (state of charge) 自动均衡及公共点母线电压支撑控制,在线路电阻发生变化时可以自适应的调整控制参数。文献[5][6]通过下垂控制对控制电压加以修正,但是由于其分别采用的是氢电混合储能和飞轮-锂电池混合储能,只需对锂电池的 SOC 加以调控,不适用于两种电化学储能设备构成混合储能的应用场合。

本研究针对锂电池和超级电容两种储能元件的不同特性对两者进行能量分配管理,在充分分析传统下垂控制局限性的基础上,提出一种改进 SOC 幂指数下垂控制,解决了传统下垂控制储能输出电流均衡度差和直流输出电压偏移的问题,提高了系统稳定性。

1 光伏电池、锂电池及超级电容模型

本研究的光储直流微电网所含的主要元件有:光伏发电设备、直流负载以及混合储能系统,其结构如图 1 所示,DESS 中的各储能元件分别由双向 DC/DC 变换器并联连接至母线,从而实现能量在储能元件和直流母线之间的双向流动。

DESS 系统的优势在于:锂电池具有高能量密度的特点;超级电容能快速、频繁地进行充放电^[7]。当光储直流微电网中出现功率波动时,DESS 通过下垂控制调控不同类型储能的输出功率从而抵消系统中的不平衡功率,维持电网稳定。

实际应用中,考虑到储能设备的漏电流很小,因此可以忽略漏电阻。锂电池和超级电容线性模型如图 2 所示。该模型的数学表达式为:

$$\begin{cases} U_{\text{batref}} = u_{\text{bat}} + R_{\text{bat}} i_{\text{bat}} \\ U_{\text{scref}} = u_{\text{sc}} + R_{\text{sc}} i_{\text{sc}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, U_{batref} 和 U_{scref} 分别是锂电池和超级电容的直流输出电压的参考值; u_{bat} 、 u_{sc} 分别是锂电池和超级电容变换器的输出电压; R_{bat} 、 R_{sc} 分别为对应电

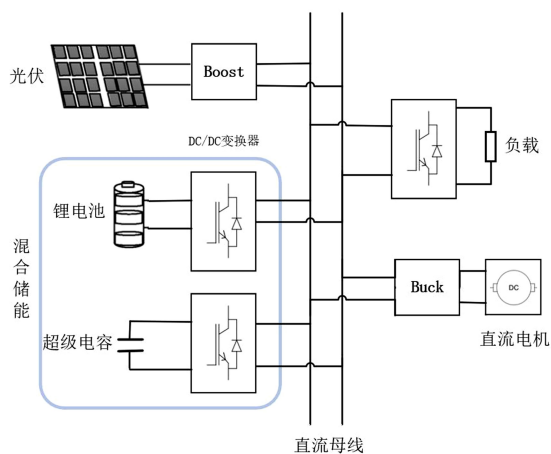


图 1 含混和储能系统的光储直流微电网系统结构图
Fig.1 Structural diagram of a photovoltaic DC microgrid system with hybrid energy storage systems

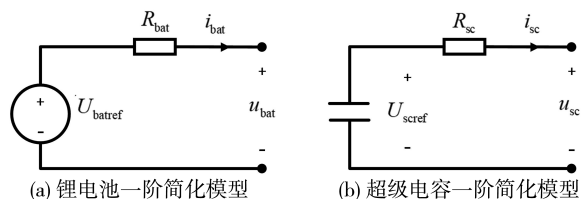


图 2 锂电池与超级电容模型

Fig.2 Lithium battery and supercapacitor models

阻; i_{bat} 、 i_{sc} 分别为对应电流。

光伏电池的模型则采用改进单二极管模型,采用一个感光电流源并联一个二极管,用串联电阻 R_s 和分流电阻 R_{sh} 表示材料缺陷和欧姆损耗。一般情况下,电池电路中串联电阻值 R_s 和 R_{sh} 相对小很多,因此近似计算时可以忽略分流电阻的影响。光伏电池模型如图 3 所示。

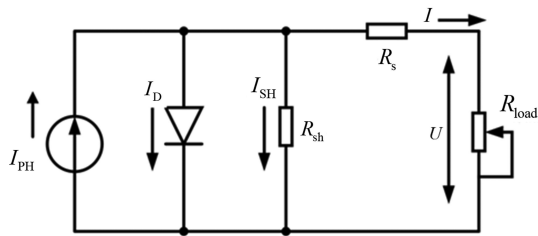


图 3 光伏电池模型

Fig.3 Photovoltaic cell model

光伏电池数学模型为:

$$U = U_D + IR_s \quad (2)$$

$$I = I_{\text{ph}} - I_D - I_{\text{SH}} \quad (3)$$

其中, I_{ph} 为光伏电池总电流; U_D 、 I_D 分别为二极管的电压和电流; U 、 I 分别为电池的输出电压和电流; I_{SH} 为泄漏电流。光伏电池采用最大功率点跟

踪控制(maximum power point tracking, MPPT), 光伏输出运行在最大功率点时系统运行效率高。

2 传统下垂控制原理与缺陷

传统下垂控制方法在面对容量小的系统时稳压效果良好,但随着直流微电网规模的不断发展,传统下垂控制的局限性也越来越显著,主要表现为输出电流均衡度偏差大和存在直流电压跌落两个方面的缺陷^[8]。

2.1 输出电流均衡度偏差

图4为混合储能系统的简化示意图,其中 R_{line1} 和 R_{line2} 为各储能变换器到直流母线之间的线路电阻,表征变换器以及连接线上产生的损耗。以锂电池和超级电容组成的混合储能系统为例,其传统下垂控制关系式为:

$$\begin{cases} u_{bat} = U_{batref} - R_1 i_{bat} \\ u_{sc} = U_{scref} - R_2 i_{sc} \end{cases} \quad (4)$$

其中, R_1 、 R_2 是下垂控制系数。

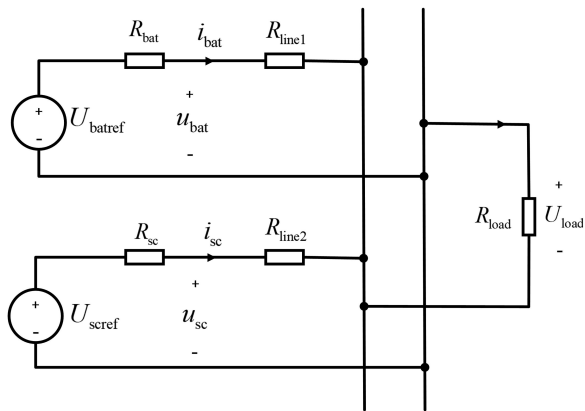


图4 混合储能系统简化示意图

Fig.4 Simplified schematic diagram of hybrid energy storage system

由于储能单元都并联在直流母线上,因此可以认为两者的输出电压相等,令 $U_{batref} = U_{scref}$,此时锂电池和超级电容的储能变换器的输出电流之比即输出电流均衡度可以表示为:

$$\frac{i_{bat}}{i_{sc}} = \frac{R_2 + R_{line2}}{R_1 + R_{line1}} = \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_{line2} - \frac{R_2}{R_1} R_{line1}}{R_1 + R_{line1}} \quad (5)$$

从式(5)可以看出 DESS 的输出电流均衡度不仅与下垂系数有关,还受到线路电阻的影响。传统下垂控制选择了忽略线路电阻 R_{line1} 和 R_{line2} ;然而,随着直流微电网中的储能系统规模不断增

大,线路电阻不可忽略,各个储能元件的荷电状态以及输出电流如式(6)(7)。

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_e} \int i_{dc} dt \quad (6)$$

$$i_{dc} = -C_e \cdot SOC' \quad (7)$$

其中, i_{dc} 是储能单元的输出电流; SOC_0 是该储能的 SOC 初始值; C_e 是储能电容值。

由于线路电阻值不同,导致各储能输出电流均衡度不为1^[9]。从式(6)可见,输出电流大的储能单元的 SOC 值下降较快,输出电流小的储能单元的 SOC 值下降较慢,即本该由 SOC 值大的储能单元多放电来保证各单元的放电均衡,实际却相反,导致在极端情况下储能单元过充过放从而陆续退出运行。剩余容量不足以支持系统时,甚至可能导致整个系统崩溃^[10]。

综上所述,理想的储能充放电目标是在系统稳态下各储能具有相同的输出电流,从而保证各个储能的 SOC 变化率相等,避免过充过放的危险。

2.2 直流电压偏差

传统下垂控制的另一个缺陷则是由于采用了下垂控制而导致的输出电压偏差。从式(4)可以得到该直流电压偏差值的表达式为:

$$\begin{cases} \Delta u_{bat} = R_1 i_{bat} \\ \Delta u_{sc} = R_2 i_{sc} \end{cases} \quad (8)$$

由于储能输出电流 i_{bat} 和 i_{sc} 不等于0,下垂控制带来的直流电压偏差随着输出电流而变化,影响系统稳定性。如果直流电压偏差超过最大允许电压偏差 Δu_{dmax} ,控制方法的准确度还会受影响,所以要对其进行补偿或修正。

3 改进 SOC 幂指数下垂控制策略

为了解决传统下垂控制方法的缺陷,以由一个锂电池储能单元和一个超级电容储能单元组成的 DESS 为研究对象。两个储能元件的变换器采用分布控制的原则,储能的输出功率为:

$$\begin{cases} p_{bat} = u_{bat} i_{bat} + R_{line1} i_{bat}^2 \\ p_{sc} = u_{sc} i_{sc} + R_{line2} i_{sc}^2 \end{cases} \quad (9)$$

其中, p_{bat} 和 p_{sc} 分别为锂电池和超级电容的输出功率,以放电为正。

在直流微电网中,储能设备的输出功率等于负载功率 P_{load} 与光伏输出功率 P_{pv} 的差值:

$$P_{batref} + P_{scref} = P_{load} - P_{pv} \quad (10)$$

锂电池和超级电容充电和放电时的下垂系数 R_1 和 R_2 受各自储能 SOC 影响,其数值上与额定电流之间满足式(11)。

$$R_1 i_{\text{bat}} = R_2 i_{\text{sc}} \quad (11)$$

采用 SOC 幂指数下垂控制方法下垂系数与 SOC 之间的关系可以表示为:

$$R = \begin{cases} R_0 \text{SOC}^n, & i_{\text{dc}} < 0 \\ \frac{R_0}{\text{SOC}^n}, & i_{\text{dc}} > 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, R_0 为下垂系数初值, n 为 SOC 的幂指数, i_{dc} 表示储能的输出直流电流,同样以放电为正。

放电时输出电流和 SOC^n 成正比, SOC 较大的储能单元输出电流较大, SOC 下降速率较快; SOC 较小的储能单元输出较小电流, SOC 下降速率较慢;充电时情况则相反。那么通过调节下垂系数 R_1 和 R_2 的值就可以使两个储能单元的输出电流相等。

DESS 中锂电池和超级电容的线路电阻 R_{line1} 和 R_{line2} 可以通过阻抗在线检测法求得,由于储能变换器的输出为频率非常高的 PWM 信号,该信号会通过母线电容直接回到变换器负极,使得其作用于负载时产生的等效阻抗可以忽略不计^[11]。通过提取直流母线信号中频率等于载波信号的高频分量并通过快速傅里叶变换提取出频率与载波信号一致的分量,得到线路阻抗的计算公式为:

$$R_{\text{line1}} = \text{real} \left[\frac{\text{FFT}(u_i)}{\text{FFT}(i_i)} \right] \quad (13)$$

式中, $\text{FFT}(\cdot)$ 为对电压或者电流信号进行快速傅里叶变换; $\text{real}(\cdot)$ 为取计算值的实部。

求得线路电阻后储能元件的 SOC 可以通过式(14)求解。

$$\begin{cases} \text{SOC}_{\text{bat}} = \text{SOC}_{\text{bat0}} - \frac{1}{C_{\text{bat}}} \int \frac{U_{\text{dcref}} - U_{\text{dc}}}{R_{\text{line1}} + R_{\text{bat}\Sigma}} dt \\ \text{SOC}_{\text{sc}} = \text{SOC}_{\text{sc0}} - \frac{1}{C_{\text{sc}}} \int \frac{U_{\text{dcref}} - U_{\text{dc}}}{R_{\text{line2}} + R_{\text{sc}\Sigma}} dt \end{cases} \quad (14)$$

式中, R_{Σ} 为储能元件内阻与储能变换器等效阻抗之和。

结合式(6)和式(12)可以得到锂电池和超级电容分别在充放电情况下下垂控制的变换器输出如式(15)(16)所示。

$$\begin{cases} U_{\text{batref}} = U_{\text{dcref}} - \frac{R_{\text{bat0}}}{\text{SOC}_{\text{bat}}^n} P_{\text{batref}}, & i_{\text{dc}} > 0 \\ U_{\text{scref}} = U_{\text{dcref}} - \frac{R_{\text{sc0}}}{\text{SOC}_{\text{sc}}^n} P_{\text{scref}}, & i_{\text{dc}} > 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} U_{\text{batref}} = U_{\text{dcref}} - R_{\text{bat0}} \text{SOC}_{\text{bat}}^n P_{\text{batref}}, & i_{\text{dc}} < 0 \\ U_{\text{scref}} = U_{\text{dcref}} - R_{\text{sc0}} \text{SOC}_{\text{sc}}^n P_{\text{scref}}, & i_{\text{dc}} < 0 \end{cases} \quad (16)$$

针对直流母线电压偏差,采用二次控制对母线电压进行补偿。直流母线需求补偿量 δu_{dci} 如式(17)所示。

$$\delta u_{\text{dci}} = u_{\text{dc}} - U_{\text{dcref}} + (R_1 + R_{\text{line1}}) i_{\text{dci}} \quad (17)$$

实际运行时测得的直流母线电压值 u_{dc} 和设定的直流母线电压参考值 U_{dcref} 之差 Δu_{dci} ,如式(18)所示。

$$\Delta u_{\text{dci}} = u_{\text{dc}} - U_{\text{dcref}} \quad (18)$$

联立式(15)和(16),因为补偿状态时只考虑纵坐标参数影响,电流对时间的导数忽略不计,求得:

$$\frac{d\Delta u_{\text{dci}}}{dt} = \frac{d\delta u_{\text{dci}}}{dt} \quad (19)$$

为了提升母线电压,电压补偿量需要满足:

$$\delta u_{\text{dci}} = \int (-\sigma \Delta u_{\text{dci}}) dt \quad (20)$$

其中, σ 为收敛因子,进一步变换得到:

$$\Delta u_{\text{dci}} = \Delta u_{\text{dc0}} \cdot e^{-\sigma t} \quad (21)$$

从式(21)可见,选择合适的收敛因子 σ 可以使电压偏差在一定时间内收敛到 0,从而达到母线电压补偿的效果。最终得到的改进 SOC 幂指数下垂控制关系式可以表示为:

$$\begin{cases} u_{\text{dc}} = U_{\text{dcref}} - R_1 i_{\text{dci}} - R_{\text{line1}} i_{\text{dci}} + \delta u_{\text{dci}} \\ \delta u_{\text{dci}} = \int [-\sigma(u_{\text{dc}} - U_{\text{dcref}})] dt \end{cases} \quad (22)$$

结合以上分析,改进 SOC 幂指数下垂控制策略如图 5 所示。

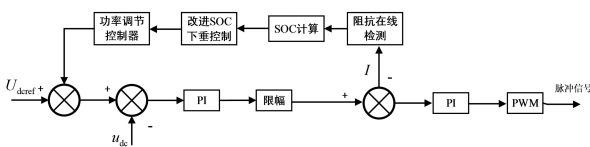


图 5 改进 SOC 幂指数下垂控策略图

Fig.5 Improved SOC power exponential droop control strategy diagram

改进 SOC 幂指数下垂控制方法根据储能的 SOC 值修正下垂系数,使得各个储能元件输出电流相等,又通过加入二次控制,将直流电压补偿量

与储能单元变换器输出电压相叠加,对母线电压的跌落或上升进行补偿和抑制。

4 算例分析

4.1 光储直流微电网控制策略与主要参数

为了验证改进 SOC 幂指数下垂控制能量管理策略的可行性与准确性,在 Matlab/Simulink 中建立了如图 6 所示的直流微电网系统模型并进行数字仿真,其中的系统参数如表 1 所示。

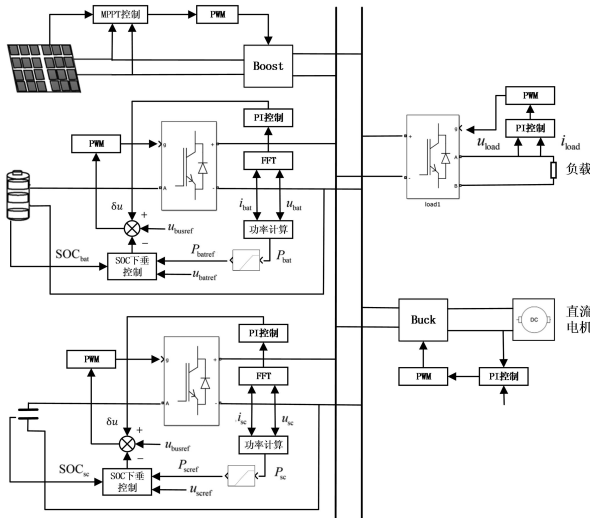


图 6 直流微电网控制策略图

Fig.6 DC microgrid control strategy diagram

表 1 直流微电网主要参数

参数名称	符号	仿真参数
直流母线电压参考值	u_{deref}	650 V
直流母线并联电容	C	0.01 F
光伏电池最大功率对应输出电压	u_{pv}	650 V
DC/DC 变换器电感	L	1 mH
PWM 载波频率	f	10 kHz
SOC 幂指数	n	5
锂电池额定电压	u_{bat}	200 V
锂电池内阻	R_{bat}	0.02 Ω
锂电池容量	Capacity	1 000 Ah
锂电池线路电阻	R_{line1}	0.4 Ω
超级电容额定功率	P_{scN}	3 kW
超级电容额定电压	U_{sc}	728.5 V
超级电容线路电阻	R_{line2}	0.8 Ω
超级电容内阻	R_{sc}	0.008 9 Ω

为了检验该控制策略在系统稳压方面和改善输出电流均衡度方面的作用,设置了如表 2 所示的 3 种工况进行仿真分析。

表 2 各工况系统参数

工况	光照强度/ $W \cdot m^{-2}$	环境温 度/ $^{\circ}C$	负载参 数/ Ω	冲击性 负载
原始运行工况	1 000	25	8	—
工况 1	500	25	8	—
工况 2	1 000	25	4	—
工况 3	1 000	25	8	直流电机

工况 1: 光伏输出阶跃变化。当光伏电池输入的光照强度减小时,验证系统稳压效果以及储能元件输出电流均衡度。

工况 2: 负载阶跃变化。光储直流微电网所带直流负载突然减小时,验证系统的稳压效果以及储能元件输出电流均衡度。

工况 3: 冲击性负载突然并入。当直流微电网中突然并入一台冲击性直流电机,验证在此情况下系统的稳压效果以及储能元件输出电流均衡度。

4.2 传统下垂控制仿真及局限性证明

为了验证传统下垂控制的局限性问题,以及与改进下垂控制形成对比,对工况 1 采用传统下垂控制方法。混合储能输出电流曲线如图 7 所示,采用传统下垂控制后虽然也达到了稳定母线电压的效果,但是锂电池和超级电容的输出电流并没有达到均衡的效果,并且稳态值相差较大,这样锂电池一直处于高放电的状态,很容易导致过充过放,降低 DESS 寿命。

4.3 各工况下的系统仿真

4.3.1 工况 1: 光伏阶跃变化

光伏变化情况下改进 SOC 下垂控制仿真结果如图 8 所示。由于光照强度下降导致光伏电池输出功率减小,引起母线电压跌落,跌落值为 2 V,与此同时混合储能系统出力弥补微电网中的功率缺额,使直流母线电压经 0.15 s 后恢复至稳定电压。在功率变化瞬间超级电容优先响应并输出电流,在系统再次达到稳定后,锂电池和超级电容的

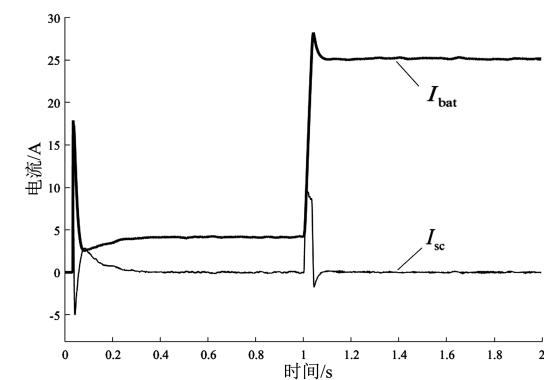
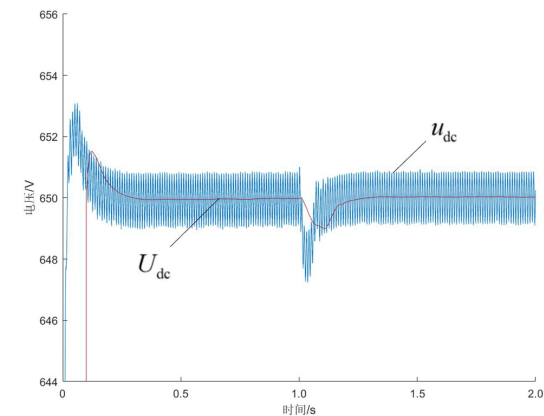


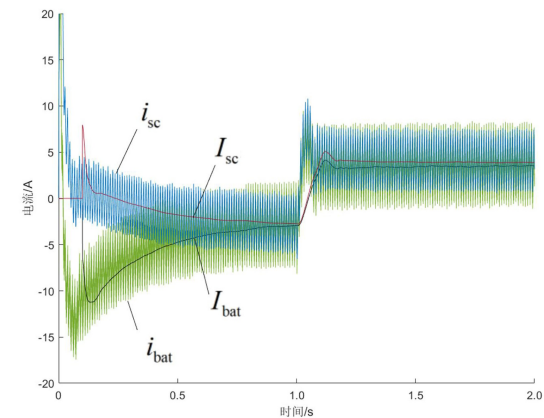
图 7 传统下垂控制储能输出电流

Fig.7 Conventional droop control energy storage output current

输出电流曲线具有良好的均一度,与理论期望相符合。



(a) 直流母线电压瞬时值与有效值



(b) DESS输出电流瞬时值和有效值

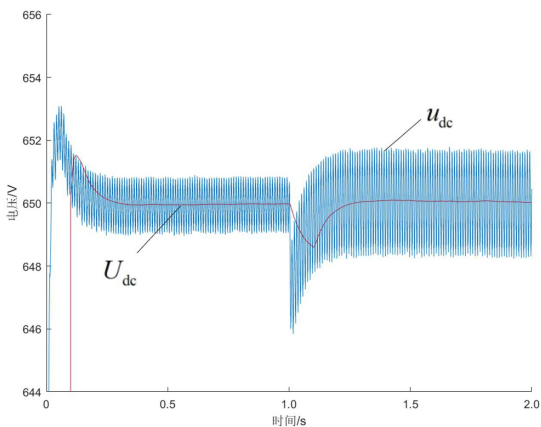
图 8 光伏阶跃变化情况仿真波形

Fig.1 Simulated waveforms for PV step change

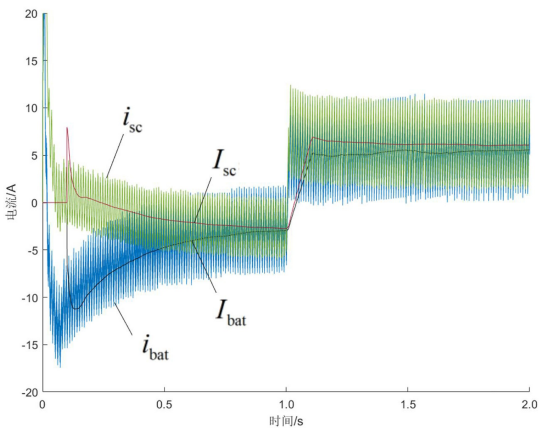
4.3.2 工况 2:负载阶跃变化

保持光伏发电设备光照强度和环境温度不变。如图 9 所示,1 s 时直流负载由 8 Ω 下降到 4 Ω ,由于负载变化导致系统中出现不平衡功

率,造成母线电压跌落 4 V,锂电池和超级电容快速响应,通过改变输出功率维持系统功率平衡,经 0.15 s 后稳压过程结束,直流母线电压恢复到参考值。



(a) 直流母线电压瞬时值与有效值



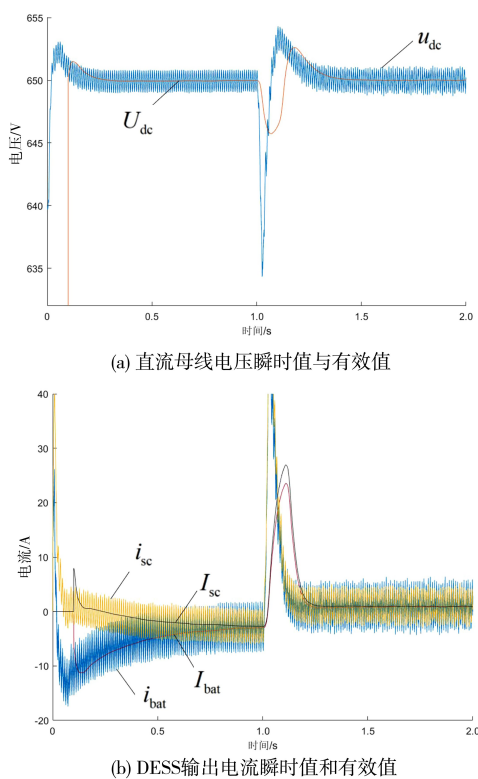
(b) DESS输出电流瞬时值和有效值

图 9 负载阶跃变化情况仿真波形

Fig.9 Simulated waveform for load step change

4.3.3 工况 3:冲击性负载突然并网

因为直流电机属于冲击性负载,需要直接接入直流微电网,其额定容量较大,且有频繁投入、切出需求,会引起电网电压波动较大且恢复较慢的变化。根据图 10 所示的仿真图像,在 1 s 时,直流微电网投入一台直流电机,导致直流母线电压大幅度下降 34 V,同时在 DESS 的作用下直流母线电压经 0.45 s 恢复稳定并且在直流母线电压稳定后,锂电池和超级电容的输出电流具有很好的均一度,证明在较为严重的母线电压波动情况下采用改进 SOC 幂指数下垂控制依然可以维持电压稳定,证明了该方法的可行性和有效性。



(a) 直流母线电压瞬时值与有效值

(b) DESS输出电流瞬时值和有效值

图 10 冲击性负载并网情况仿真波形

Fig.10 Simulated waveforms for impact load grid connection

5 结论

本研究考虑了含有混合储能的光储直流微电网的能量管理方法,提出一种改进 SOC 幂指数下垂控制方法,结论如下:

1) 采用 SOC 下垂控制,通过建立储能 SOC 与下垂系数之间的幂指数关系来控制混合储能设备的输出,并使锂电池和超级电容的输出电流达到良好的均一性,既能够避免储能的过充过放,又能够稳定直流微电网母线电压,提高了系统的稳定性。

2) 相较于传统下垂控制,所提方法切合实际工程,考虑了储能变换器到直流母线间的线路电阻所造成的误差以及采用下垂控制所带来的直流电压跌落,对前者采用阻抗在线检测的方法实时计算得到线路电阻值;对于后者则是采用二次控制,对母线电压的跌落和上升进行补偿和抑制。

3) 通过搭建光储直流微电网模型并进行仿真,证明了相对于传统下垂控制,所提改进 SOC 幂指数下垂控制具有良好的储能输出电流控制效果,且在光伏变化、负载变化以及冲击性负荷并网等方面都具有良好的稳压效果。

参考文献:

- [1] 雷鸣宇,杨子龙,王一波,等. 光/储混合系统中的储能控制技术研究[J]. 电工技术学报,2016,31(23):86-92.
- [2] 马英浩,刘琛,谢开贵,等. 电力系统网络传输灵活性及其评价综述[J]. 中国电机工程学报,2023,43(14):5429-5441.
- [3] 秦磊,董海鹰,王润杰. 基于卡尔曼滤波和模型预测控制的混合储能平抑风电功率波动策略[J/OL]. 电网技术:1-12 [2024-04-03]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1105>.
- [4] 王腾,张新燕,王亚东,等. 基于二阶滤波的混合储能系统能量管理控制策略[J]. 太阳能学报,2022,43(11):399-405.
- [5] 申永鹏,孙嵩楠,王延峰,等. 混合储能系统闭环 Haar 小波变换能量管理方法[J]. 太阳能学报,2023,44(10):523-530.
- [6] 贺誉京,陈洁,张久明. 小波包分析与 BP 神经网络预测相结合的在线能量管理策略[J]. 电网与清洁能源,2023,39(9):9-18.
- [7] 钱韦廷,赵长飞,万灿,等. 基于概率预测的混合储能平抑风电波动随机优化调控方法[J]. 电力系统自动化,2021,45(18):18-27.
- [8] 王凯,张继勇,杨树德,等. 改进型分布式储能 SOC 自适应下垂控制[J/OL]. 电气工程学报:1-8 [2024-04-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20230510.1231.012.html>.
- [9] 李鹏程,张纯江,袁然然,等. 改进 SOC 下垂控制的分布式储能系统负荷电流分配方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(13):3746-3754.
- [10] 柴秀慧,张纯江,柴建国,等. 分布式储能变调节因子 SOC 下垂控制及功率调节[J]. 太阳能学报,2021,42(9):477-482.
- [11] 段双明,于航,刘聪,等. 考虑储能单元健康状态与荷电状态一致性的 BESS 功率分配策略[J]. 电力系统自动化,2023,47(5):65-73.