考虑蓄电池SOC的直流微电网协调控制策略研究

刘洪硕，罗向阳，张 伟，刘 越，孙炜棋，郭明辉

（国网冀北电力有限公司承德供电公司，河北 承德 067000）

摘要：微电网技术是解决可再生能源高效利用的有效手段，直流微电网技术更是优势明显，成为研究的热点。首先介绍了直流微电网系统的具体结构，分析了下垂控制策略的原理，为后续改进提供了理论支撑。其次，考虑蓄电池的SOC管理和蓄电池间充放电互动，得到了下垂控制虚拟阻抗的自适应计算方法，提出了自适应下垂控制策略，并进一步考虑蓄电池的充放电特性和系统各单元的功率配合，提出了系统级别的协调控制策略，以维持系统功率平衡和直流母线电压稳定。最后，在Matlab/Simulink中搭建了相应的仿真模型，验证了所提控制策略的有效性。

关键词：直流微电网；下垂控制；蓄电池管理；协调控制

Research on DC microgrid coordinated control strategy considering battery SOC

LIU Hongshuo, LUO Xiangyang, ZHANG Wei, LIU Yue, SUN Weiqi, GUO Minghui

(Chengde Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Company Limited , Chengde 067000, China)

Abstract: Microgrid technology is an effective way to solve the efficient use of renewable energy. DC microgrid technology has obvious advantages and has become a research hotspot. Firstly, the specific structure of the DC microgrid system is introduced, the principle of the droop control strategy is analyzed, and theoretical support is provided for subsequent improvements. Secondly, considering the battery SOC management and battery charge-discharge interaction, an adaptive calculation method for the droop control virtual impedance is obtained. An adaptive droop control strategy is proposed. Further considering the charge-discharge characteristics of the battery and the power coordination of each unit of the system, a system-level coordinated control strategy is proposed to maintain system power balance and DC bus voltage stability. Finally, a corresponding simulation model is built in Matla/Simulink to verify the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: DC microgrid; droop control; battery management; coordinated control

0 引言

随着经济的发展和人们生活水平的提高，对于电力系统的供电要求越来越高，同时对于供电的多样性和灵活性也提出了新的需求。微电网是一个独立的供电系统，可以运行在并网或孤岛模式，通过相应的变换器将本地分布式电源和负载连接[1-2]。虽然现有的微电网通常采用交流系统，但由于低压直流系统的优越特性，直流微电网已引起越来越多的关注[3-4]。

直流微电网的主要优点是它可以更好地适应直流形式的分布式电源和负载。另外，在直流微电网中的变换器使用更少，可以在降低成本的同时减小功率损耗。由于直流微电网中没有超肤效应等，可以降低系统的功率传输

损耗，比交流微电网更加经济实用[5-7]。另一方面，直流微电网的控制策略相对简单，减少了无功补偿和控制，简化了控制策略[8]。由于在直流微电网中不会存在无功功率和谐波的影响，其电能质量将进一步提升[9]。

当然，由于是新兴电网架构，直流微电网也存在许多限制和挑战。从电网运行的角度来看，使用电压差作为系统功率分配的方式，有时会影响直流微电网中的电压质量，特别是使用直流母线电压控制方法时[10]。在这种情况下，直流微电网的功率分配和负荷共享都将依靠系统的直流母线电压，这将会造成系统的功率分配偏差。而直流微电网系统的保护更加昂贵，远没有交流系统成熟。因此，直流微电网的保护方法应该重新被研究，以减少传统保护的限制和缺陷。

下垂控制是直流微电网经常使用的控制策略[11]，但是传统下垂控制策略存在功率分配不均、控制目标单一的缺点，同时在系统级别的协调控制策略中，都没有考虑蓄电池的容量和SOC的影响，将不利于延长蓄电池的使用寿命，这会对系统造成很大的影响，增加系统故障的风险[12-13]。为了更好地发挥直流微电网的作用和优势，本文进行直流微电网协调控制策略的研究，利用分层的原理，从系统级别和变换器级别两层来进行直流微电网的控制。基于系统的协调控制需要和传统下垂控制的缺点，提出了自适应下垂控制策略，可以根据蓄电池的SOC进行下垂虚拟阻抗的改变和计算，从而将蓄电池的SOC纳入到控制之中，加强了蓄电池的管理力度，提高了蓄电池的使用寿命。进一步提出了直流微电网的协调控制策略，利用自适应下垂控制，同时考虑蓄电池的充放电转换、SOC管理等目标，实现了系统安全稳定的运行。

1 直流微电网结构

系统直流微电网结构如图1所示，直流微电网系统包括分布式电源、公共电网、蓄电池储能以及交直流负荷等单元。系统中分布式电源主要以光伏电池和风力发电机为主，由于其随机性和波动性较强，系统中加入了相应的蓄电池储能单元，从而可以实现功率的平抑以及系统稳定运行。同时，有两个蓄电储能单元，可以根据系统的控制策略和相关情况进行充放电策略转换和SOC管理，提高蓄电池的功能和使用寿命。在直流微电网系统需要设定相应的协调控制策略进行各个状态下系统母线电压的维护，发挥直流微电网的优势。

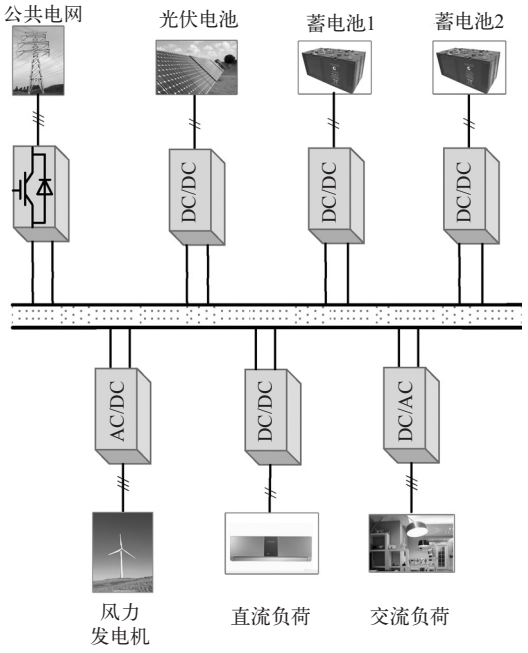


图1 直流微电网结构

Fig. 1 DC microgrid structure

2 传统下垂控制简介

为了更好地进行多变换器之间的并联运行控制，需要更加灵活的控制策略来进行相应的电压和功率的控制。根据相应的并联同步发电机的运行特点和原理，得到了多变换器并联运行控制的原理，发展和改进成为最有效的下垂控制策略[14]。对于变换器来说，不像同步发电机调节运行速度来调节输出功率，变换器的输出电压调节需要根据当前电网的运行状态，根据相应的控制策略，提供输出电流参考，从而形成闭环控制回路。传统下垂控制的输出表达式为

$$V^*_{out}=V_{ref}-I_0R_d \tag{1}$$

式中，V^*_{out}为控制策略中的电压环参考数值；V_{ref}为变换器输出电压参考数值；I_0为变换器输出电流数值；R_d为虚拟阻抗数值。

对系统来说，下垂控制策略中如果虚拟阻抗设置为0，那么变换器相当于是电压源形式。如果下垂控制策略中虚拟阻抗设置为无穷大，那么变换器相当于电流源形式。从后一种情况来说，通常情况下以恒定的电流输入或输出来设定电流参考值。因此，通常所说的恒功率负载或者恒功率电源就是源于电流源变换器的概念。这些可以清楚地对于分布式电源的MPPT控制以及蓄电池充电模型进行解释和说明。

例如，光伏电池和风力发电机通常情况下运行在最大功率追踪状态下，从而恒定输出最大功率，提高系统的可再生能源利用率。但是在直流微电网系统中，应该优先考虑系统的直流母线电压数值，维持其在正常合理的范围之内，这样就要求系统中的一些单元运行在电压源变换器模式。系统中的储能单元可以进行双向的功率流动，是一个很好的选择，在系统的分布式电源和负荷之间出现相应的功率不平衡，都可以利用储能单元进行控制。但是，如果系统中的能量剩余过多，持续的充电就会导致蓄电池容量满额，此时蓄电池就不能进行母线电压的调节，这样就需要分布式电源进行母线电压的控制。因此，蓄电池和分布式电源均可以运行在电压源变换器或者电流源变换器模式。

3 下垂控制直流微电网中的功率分配

在系统运行过程中，利用电压下垂控制的分布式电源在静态状态下可以等效为一个电压源和虚拟电阻串联，而恒功率负载可以等效为一个电流源和相应阻抗并联[15-16]。需要注意的是，在微电网系统潮流中，恒功率负载和恒功率电源表示的几乎相同，只是功率的流向相反。直流微电网系统下垂控制下的等效电路图如图2所示。

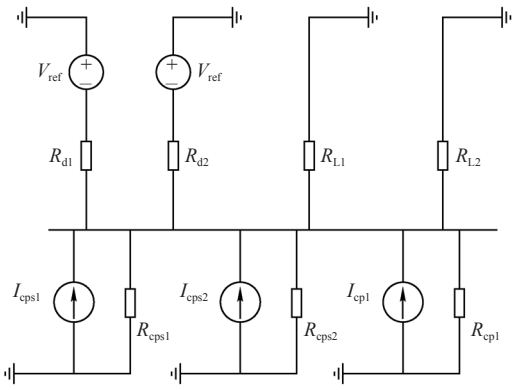


图2 下垂控制下直流微电网等效电路图

Fig .2 Equivalent circuit diagram of DC microgrid under droop control

假设在直流微电网系统中，下垂控制下的变换器输出参考电压相同，在不考虑系统线路损耗的情况下，对于直流微电网可以有如下公式，即

$$V_{DC}=\frac{\frac{V_{ref}}{R_d}-I_{cp}}{\frac{1}{R_d}+\frac{1}{R_{load}}+\frac{1}{R_{cp}}} \tag{2}$$

式中，V_{ref}为参考电压；I_{cp}为系统中恒功率电源和恒功率负载产生的电力总和；R_{cp}为系统中的恒功率电源和恒功率负载产生的阻抗总和；R_d为系统的虚拟阻抗总和；R_{load}为系统的负载阻抗总和。

R_d、R_{load}可以表示为

$$R_d=\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{R_{d,1}}} \tag{3}$$

$$R_{load}=\frac{1}{\sum_{i=1}^{m}\frac{1}{R_{load,1}}} \tag{4}$$

式中，n为运行在下垂模式下的分布式电源个数；m为系统阻性负载个数。

在系统中如果线路阻抗不可忽略，那么在系统的设计和计算中加入相应合适的R_d即可。根据分析可以得到，线性化的恒功率负荷可以表示为

$$R_{cpl}=-\frac{V^2_{DC}}{P_{cpl}} \tag{5}$$

$$I_{\mathrm{cpl}}=2\frac{P_{\mathrm{cpl}}}{V_{\mathrm{DC}}} \tag{6}$$

式中，P_{cpl}为恒功率负载的功率需求。

在式中如果分析的恒功率电源功率流向相反，那么其表示方式与式（5）、式（6）也会对应相反。在恒功率电源和恒功率负载中，式（2）中的等式仅仅计算的是相应的代数计算公式，而根据相应的等效原理和计算可以得到

$$aV_{\mathrm{DC}}^2+bV_{\mathrm{DC}}+c=0 \tag{7}$$

$$a=\frac{1}{\frac{1}{R_{\mathrm{load}}}+\frac{1}{R_{\mathrm{d}}}} \tag{8}$$

$$b=-\frac{V_{\mathrm{ref}}}{R_{\mathrm{d}}} \tag{9}$$

$$c=P_{\mathrm{cp}} \tag{10}$$

根据相应的计算公式可以得到

$$V_{\mathrm{DC1,2}}=\frac{\frac{V_{\mathrm{ref}}}{R_{\mathrm{d}}}\pm\sqrt{(\frac{V_{\mathrm{ref}}}{R_{\mathrm{d}}})^2-4P_{\mathrm{cp}}(\frac{1}{R_{\mathrm{d}}}+\frac{1}{R_{\mathrm{load}}})}}{2(\frac{1}{R_{\mathrm{d}}}+\frac{1}{R_{\mathrm{load}}})} \tag{11}$$

根据前述相应的公式和分析，可以得到变换器输出功率为

$$P_{\mathrm{droop}}=V_{\mathrm{ref}}i_0-R_{\mathrm{d}}i_0^2 \tag{12}$$

在式（11）中，P_{cp}为系统中恒功率电源和恒功率负载等效功率总和，对于两个输出电压V_{DC1}和V_{DC2}都存在相对应的输出电流，输出电流可以从系统其他参数中获得。在式（11）中，为了确定更加合适的解，需要对式（11）进行相应的分析。在系统中需要分开分析等效的恒功率电源和恒功率负载两者哪种功率交换更大。如果系统中恒功率电源输出功率更大，那么系统中的P_{cp}为负的，则式（11）中的二次方根表达式结果比$V_{\mathrm{ref}}/R_{\mathrm{d}}$的数值要大。在这种情况下很明显就有一个数值合适，另一个解的数值为负从而不满足实际。如果系统中恒功率负载功率数值更大，那么P_{cp}为正的，此时系统中两个数值皆可。在系统输出功率的大小和输出电压相关，下垂控制可以根据相应的母线电压进行输出功率大小调节。

4 直流微电网蓄电池控制

在直流微电网中，蓄电池起着非常重要的角色和作用，其控制策略至关重要，影响着系统直流母线电压的稳定和功率的平衡。蓄电池可以用一个电阻和两个电阻电容元件进行等效，其等效电路图如图3所示。

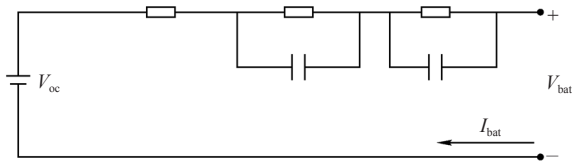


图3 蓄电池等效电路图

Fig. 3 Battery equivalent civcuit diagram

根据图3所示的等效电路图，可以得到蓄电池端电压为

$$V_{\mathrm{t}}=V_{\mathrm{oc}}-I_{\mathrm{bat}}R(s) \tag{13}$$

式中，V_{oc}为由蓄电池SOC决定的系统开路电压；$R(s)$为蓄电池等效阻抗，其可以表示为

$$R(s)=R_{\mathrm{si}}+\frac{R_{\mathrm{tf}}}{1+sR_{\mathrm{tf}}C_{\mathrm{tf}}}+\frac{R_{\mathrm{ts}}}{1+sR_{\mathrm{ts}}C_{\mathrm{ts}}} \tag{14}$$

式中，R_{si}为瞬时电阻；R_{tf}、C_{tf}、R_{ts}和C_{ts}分别为R、C对应的快速和慢速放电数值。

蓄电池，良好的充放电控制对于其寿命至关重要。蓄电池充电可以有很多不同的方法，目前，先限流充电然后恒压充电是最快捷有效的方法。蓄电池恒压充电时，浮动电压和升压电压经常被提到，浮动电压完全是为了给蓄电池充电，铅酸蓄电池每个电池数值通常在2.3～2.4 V，而升压电压相对数值较高，每个蓄电池电压通常为2.4～2.5 V。两个电压量作用不同，在铅酸蓄电池充电器中需要对这两个数值进行设置。蓄电池控制策略如图4所示，包括恒压充电和电压下垂充电两种模式，可以通过变换信号进行模式切换。

5 自适应下垂计算

对于直流微电网系统，伴随着系统负荷的增长或者系统结构的变化，系统中所配置的蓄电池容量需要进行扩大。当增加蓄电池容量的时候，在原有的蓄电池组中增加蓄电池块是不

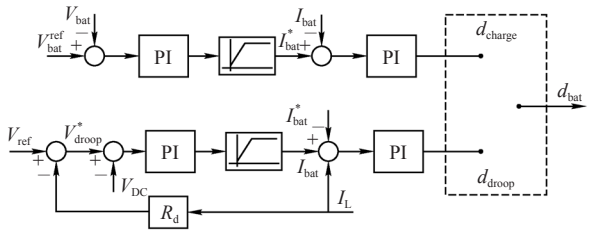


图4 蓄电池控制策略

Fig. 4 Battery control strategy

现实的，因此只能在系统中增加相应的蓄电池组，同时蓄电池也在充电和放电之间切换。各个蓄电池投入时刻不同，蓄电池组的SOC会出现很大的差别。在传统的下垂控制模式下，蓄电池的输出电流大小取决于下垂控制中虚拟阻抗的设置。对于两个具有不同容量或者不同初始SOC的蓄电池，使用相同的虚拟阻抗数值是不可行的，会导致两者的SOC一直存在偏差。尽量保持系统中的蓄电池SOC一致有利于提高其使用寿命。为了保持SOC基本一致，需要让SOC高的蓄电池放电速度快，而SOC低的蓄电池放电速度慢，充电的时候是同样道理。

为了实现上述的目的，需要让蓄电池的SOC和下垂控制的虚拟阻抗协调变化。蓄电池的虚拟阻抗数值需要对应蓄电池的SOC大小，当虚拟阻抗增大时，蓄电池的放电速度会降低。因此，在蓄电池充电的时候，SOC大的蓄电池需设置更大的虚拟阻抗；而放电的时候，SOC大的蓄电池需要设置更小的虚拟阻抗。可以根据这个原则，对虚拟阻抗和SOC的对应关系进行设置，用于蓄电池的充放电。蓄电池的SOC计算公式为

$$\mathrm{SOC}_i(t)=\mathrm{SOC}_i(0)-\int_0^t \eta_i \frac{I_{\mathrm{bat},i(\tau)}}{C_{\mathrm{bat},i}}(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{15}$$

式中，$\mathrm{SOC}_i(0)$为蓄电池的初始SOC；η_i为蓄电池充放电效率。

根据上述的分析和公式计算，蓄电池充电和放电时的虚拟阻抗计算为

$$\begin{cases} R_{\mathrm{d},i,\mathrm{charge}}=\dfrac{C_{\mathrm{bat},i}}{C_{\max}}\alpha\exp(\beta\mathrm{SOC}) \\ R_{\mathrm{d},i,\mathrm{discharge}}=\dfrac{C_{\mathrm{bat},i}}{C_{\max}}\alpha\exp(\beta(100-\mathrm{SOC})) \end{cases} \tag{16}$$

式中，$C_{\max}$为蓄电池最大的容量数值。

6 系统协调控制

为了系统更加稳定的运行，同时实现系统的直流母线电压稳定和功率平衡，需要进行系统协调控制分析，确定直流微电网系统级别的模式切换策略，同时计算各个单元的下垂虚拟阻抗，以及进行蓄电池充放电控制。为了更加灵活地控制蓄电池的充放电以及SOC管理，不影响系统的直流母线电压，需要注意以下几点：①在系统正常方式下，蓄电池的SOC管理根据自适应下垂系数的计算进行处理；②初始SOC更高的蓄电池应该最先被充满；③如果系统中功率剩余较多，那么蓄电池应该一直保持满充状态；④系统中两个电池充电，先充电的也需要优先放电；⑤一个电池充电的时候，当另一个电池SOC低于90%的时候，这个电池需要开始放电。如果系统按照此原则进行，电池将以循环的方式处于满充状态，这样将会提升蓄电池的使用寿命，加强蓄电池储能的管理。系统协调控制分为四种模式，具体转换方式如图5所示，四种模式具体如下。

1）工作模式1为正常运行方式，分布式电源运行在MPPT模式，蓄电池运行在自适应下垂控制方式下，根据系统中的分布式电源输出功率和负荷功率大小来确定蓄电池的充电和放电策略，相应的SOC计算可以根据前述的式（15）。这种工作模式下，系统进行蓄电池SOC监控，并且对SOC更高的蓄电池进行充电指令设定，在系统功率出现剩余的时候，SOC高的最先充电。如果蓄电池最初SOC为满的，当系统中下垂控制下的蓄电池SOC低于90%的时候开始放电。

2）工作模式2为蓄电池第一种充电模式，由于蓄电池的电压比其SOC更加灵活，因此这种模式以蓄电池的电压为相应的模式转换触发器。在电池电压达到相应数值时，这时系统中的分布式电源转换为下垂控制状态，而蓄电池转换为稳压充电状态。当系统中的放电限制器

开启的时候，蓄电池将会停止放电。蓄电池开始充电的时候，当蓄电池SOC达到100%的时候，将系统的充电指令传达到下一个蓄电池，当完成之后，系统返回到工作模式1。

3）工作模式3为蓄电池第二种充电模式，此时一个蓄电池充满电，另一个电池电压达到了触发电压数值，这时分布式电源转换为下垂控制模式，而此蓄电池进入充电模式，在SOC达到100%后，系统进入工作模式1。

4）工作模式4为蓄电池满电模式，此时蓄电池在浮压状态之下，而分布式电源处于下垂控制状态下。在系统负荷大于分布式电源输出的时候，需要设置电压低值，这时蓄电池开始处于放电状态，从而恢复直流母线电压。在这个模式下，首先满电的电池将会优先放电，当系统电压低于设置的电压低值时就会由工作模式4转换为工作模式1。

7 仿真分析

为了进行上述协调控制策略的验证，在Matlab/Simulink中搭建仿真模型，对相应的控制策略进行仿真分析，设定系统直流母线电压参考值为500 V，系统包括两个蓄电池单元、光伏电池、风力发电机以及相应的负荷。

7.1 工作模式1与工作模式2转换

相应的仿真波形如图6所示，系统开始工作

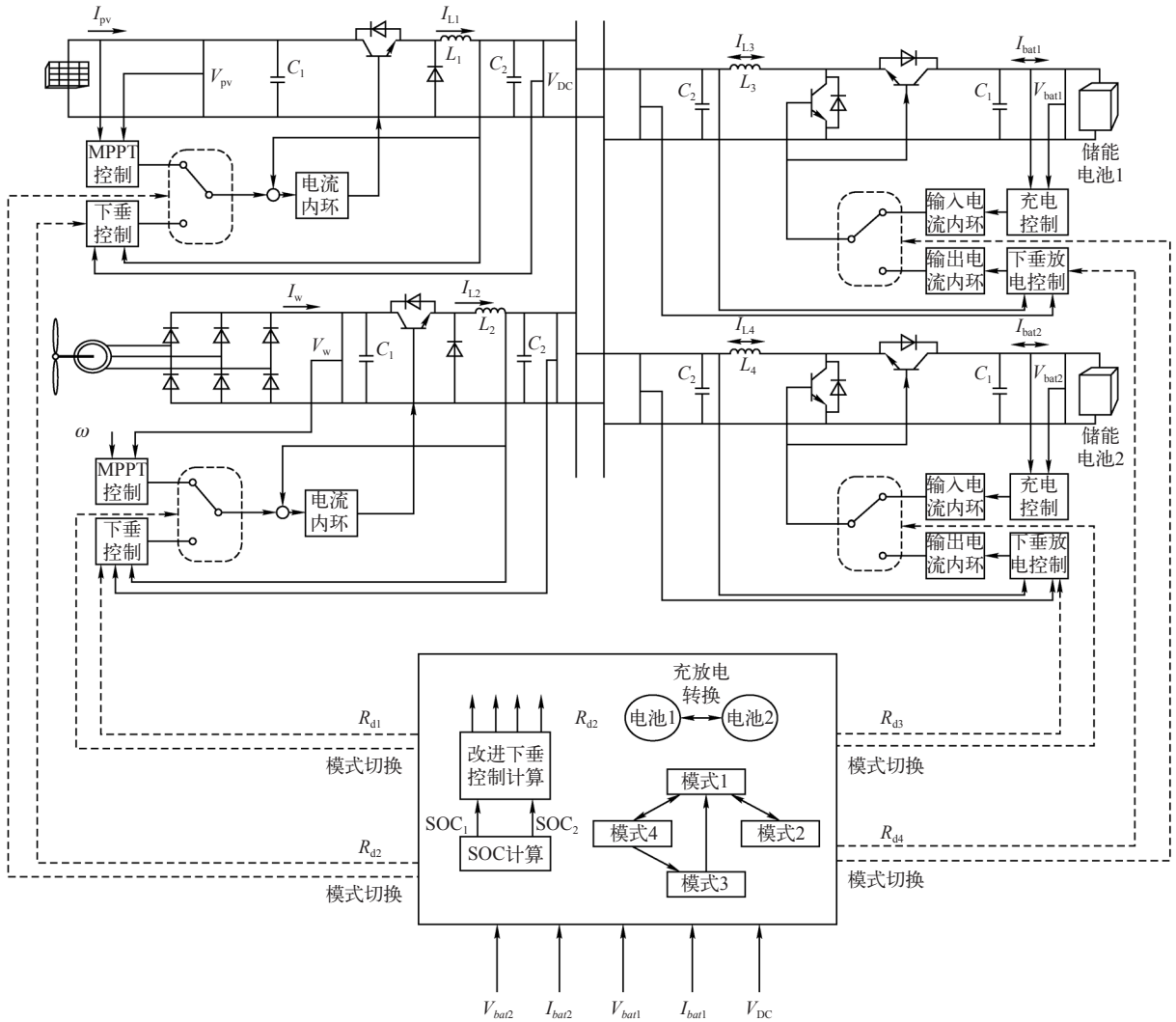
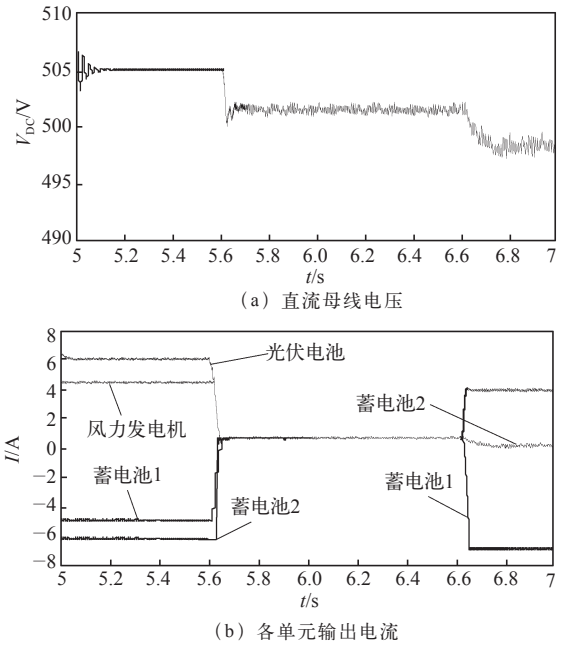


图5 系统协调控制示意图

Fig. 5 system coordination control diagram

在模式1之中，光伏电池和风力发电机输出功率大于系统负荷的消耗，蓄电池进行剩余功率的消耗。根据系统的设置，蓄电池的自适应下垂系数计算是可用的，直流母线电压在一个状态之下是保持平衡的，系统功率维持恒定。随着系统的进行和蓄电池的不断充电，在蓄电池1达到相应的浮动充电电压数值时，系统开始进入模式2中，图7为对模式2中蓄电池浮动充电转换进行波形仿真。在模式2中分布式电源开始运行在下垂控制之中，蓄电池1开始进入恒流充电方式。



（a）直流母线电压

（b）各单元输出电流

图6　模式1到模式2转换波形

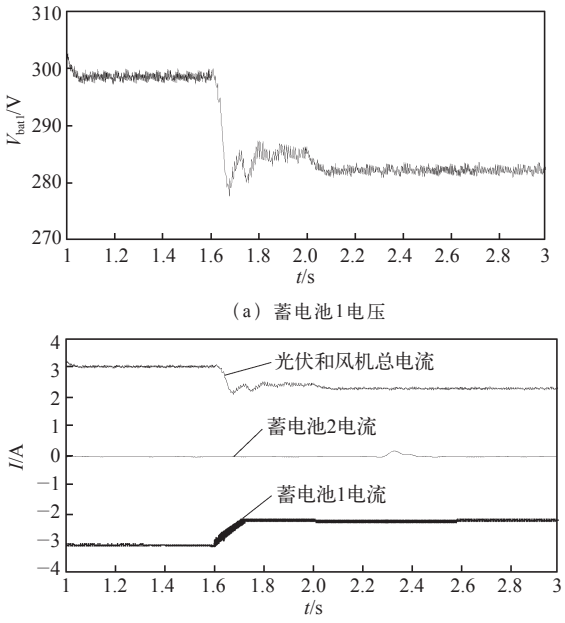
Fig. 6 Mode 1 to mode 2 wnrersion wareform

7.2 工作模式1与工作模式3转换

仿真中对模式1到模式3转换波形进行分析，得到如图8所示的波形图。在系统中如果其中一个电池SOC达到满额，另一个进行下垂充电，此时系统将转入模式3状态。这时随着系统的推进，分布式电源开始运行在下垂控制模式，来控制系统直流母线电压，而蓄电池2开始恒流充电，完成模式1到模式3的转换。

8　结束语

本文以直流微电网为研究对象，研究了直流



（a）蓄电池1电压

（b）各单元输出电流

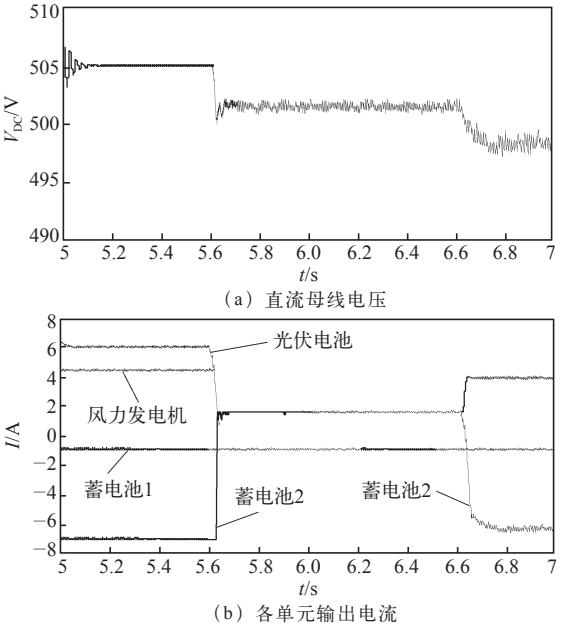
图7　模式2下蓄电池浮动充电转换波形

Fig. 7 Battery tloating charge conversion wareform in mode 2

微电网中较为热点的控制问题，得到以下结论。

1）分析了常用的下垂控制策略，在此基础上提出了变虚拟阻抗的自适应下垂控制策略，将此策略应用在相应的协调控制之中，用于分布式电源和蓄电池相应模式下的控制。

2）研究了蓄电池的充放电转换和SOC管



（a）直流母线电压

（b）各单元输出电流

图8　模式1到模式3转换波形

Fig. 8 Mode 1 to mode 3 conversion ware torm

理，利用相应的自适应下垂控制和协调控制对两个蓄电池单元进行调控，从而达到不同模式下的控制目的，实现蓄电池SOC管理和直流母线电压的维护，对蓄电池充放电管理更加智能化，丰富了协调控制的功能。

参考文献

[1] GAO F，BOZHKO S，ASHER G，et al．An improved voltage compensation approach in a droop-controlled DC power system for the more electric aircraft[J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2016，31(10)：7369-7383．

[2] THOMPSON C C，OIKONOMOU P E K，ETEMADI A H．Optimization of data center battery storage investments for microgrid cost savings，emissions reduction，and reliability enhancement[J]．IEEE Transactions on Industry Applications，2016，52(30)：2053-2060．

[3] SECHILARIU M，WANG B C，LOCMENT F．Building integrated photovoltaic system with energy storage and smart grid communication[J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2013，60(4)：1607-1618．

[4] DIAZ E R，VASQUEZ J C，GUERRERO J M．Intelligent DC homes in future sustainable energy systems[J]．IEEE Consumer Electronics Magazine，2016，5(1)：74-80．

[5] KAKIGANO H，MIURA Y，ISE T．Low voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution[J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2010，25(12)：3066-3075．

[6] XIAO J F，WANG P，SETYAWAN L．Multilevel energy management system for hybridization of energy storages in DC microgrids[J]．IEEE Transactions on Smart Grid，2016，7(2)：847-856．

[7] 孟明，陈世超，赵树军，等．新能源微电网研究综述 [J]．现代电力，2017(1)：1-7．

[8] 刘家赢，韩肖清，王磊，等．直流微电网运行控制策略[J]．电网技术，2014，38(9)：2356-2362．

[9] 孟润泉，刘家赢，文波，等．直流微网混合储能控制及系统分层协调控制策略[J]．高电压技术，2015，41(7)：2186-2193．

[10] 王盼宝，王卫，孟尼娜，等．直流微电网离网与并网运行统一控制策略[J]．中国电机工程学报，2015，35(17)：4388-4396．

[11] MAHMUD M，POTA H，HOSSAIN M．Nonlinear current control scheme for a single-phase grid-connected photovoltaic system[J]．IEEE Transactions．Sustainable．Energy，2014，5(1)：218-227．

[12] XU Y L，ZHANG W，HUG G，et al．Cooperative control of distributed energy storage systems in a microgrid[J]．IEEE Transactions on Smart Grid，2015，6(1)：238-248．

[13] TALAQ J H，El-HAWARY F，El-Hawary M E．A summary of environmental economic dispatch algorithms[J]．IEEE Transactions on Power Systems，1994，9(3)：1508-1516．

[14] SUN K，ZHANG L，XING Y，et al．A distributed control strategy based on DC bus signaling for modular photovoltaic generation systems with battery energy storage[J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2011，26(10)：3032-3045．

[15] 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)：892-898．

[16] GUERRERO J M，VASQUEZ J C，MATAS J，et al．Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids－a general approach toward standardization[J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2011，58(1)：158-172．

作者简介

刘洪硕

刘洪硕（1991－），男，本科，工程师，主要研究方向为电网规划建设及自动化、新能源发电等。

(收稿日期：2019－05－19)EA