

文章编号:0254-0096(2019)03-0809-08

分布式电源并联系统中基于荷电状态均衡的改进型下垂控制策略

胡超¹, 张兴¹, 石荣亮¹, 刘芳¹, 徐海珍¹, 曹仁贤²

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥阳光电源股份有限公司, 合肥 230088)

摘要: 当多个分布式电源(distributed generation, DG)并联运行时,传统的下垂控制能实现各DG的输出功率均分,但无法维持储能单元荷电状态(state of charge, SOC)一致。提出一种改进的下垂控制策略,通过设计变下垂系数并引入SOC功率指令项,改变DG各单元的下垂曲线,从而使SOC较高的单元输出更多功率,反之SOC较低单元则输出功率较少,最终在空载和负载情况下均可实现各单元的SOC均衡,同时保留传统下垂控制无需互联线的优点。以2台DG并联带载为例,通过求解微分方程得到SOC均衡算式的解析结果,并通过建立控制模型分析SOC变化和参数选择对系统稳态和动态性能的影响,最后搭建100 kVA的DG并联实验平台,验证该文提出控制策略的有效性。

关键词: 分布式电源; 荷电状态; 下垂控制; 储能
中图分类号: TK514 **文献标识码:** A

0 引言

多台分布式电源(distributed generation, DG)并联系统,能解决传统大电网集中供电产生的众多问题,同时可通过采用灵活多变的控制方式优化系统的供电性能,具有广阔的应用前景^[1-4]。为使DG并联系统具备持续供电能力,必须在DG内部搭配适量的储能单元,常用的是以铅酸、锂电为蓄电池组^[5,6]。为维持DG各自储能单元荷电状态(state of charge, SOC)一致,很多文章提出各自的解决SOC均衡问题的方法^[7-11]。文献[7]通过通讯获得各单元SOC状态,并通过改变等效阻抗实现SOC均衡,同时母线电压维持恒定,其缺点在于通讯线的引入降低了系统可靠性。文献[8]中采用自适应下垂控制算法,选择下垂系数反比于SOC的 n 次方以实现均衡,文献[9]进一步根据充放电模式选取不同的下垂系数,使得充电或放电2种状态下SOC均衡速度均得到优化,然而文献[8,9]中的控制算法仅能实现带载状态下的SOC均衡,而无法空载状

态下实现。文献[10]采用自适应虚拟电阻的方式,同样具备均衡SOC的效果,但需要DG间具备互联线。文献[11]将模糊控制引入下垂控制,算法相对复杂,工程上实现较为困难。

综合目前现有的研究成果,主要存在2方面问题:1)绝大部分储能均分控制研究仅考虑直流DG并联系统,而缺乏对交流DG并联系统的研究,由于交直流DG系统在控制算法,稳定性等方面的差异,有必要对交流DG系统的SOC均衡问题进行单独分析;2)对于SOC均衡的有效性大多是基于仿真分析,缺乏相应的定量计算。针对以上问题,本文提出一种应用于交流DG并联系统的SOC均衡的改进型下垂控制算法。首先建立储能单元的基本数学模型,然后在传统下垂控制基础上提出本文的改进型下垂控制算式,以两机并联为例,计算得到SOC均衡过程的解析算式,证明算法的有效性,接下来通过建立小信号模型分析参数变化对系统稳态和动态性能的影响,最后通过仿真并搭建100 kW的交流DG并联实验平台进行相关实验验证。

收稿日期: 2016-11-07

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900300); 国家自然科学基金(51677049)

通信作者: 胡超(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事新能源利用与分布式发电技术方面的研究。61511497@163.com

1 系统模型

1.1 系统整体架构

本文提出的 DG 并联系统,由 2 台 DG 和公共负载组成,每台 DG 由蓄电池和逆变器构成,共同为负荷供电,如图 1 所示。本文主要研究多 DG 并联过程中的 SOC 均衡控制,当 SOC 过低时需采用其他设备为蓄电池充电,否则必须切除负荷,这超出本文的研究范围,不作考虑。

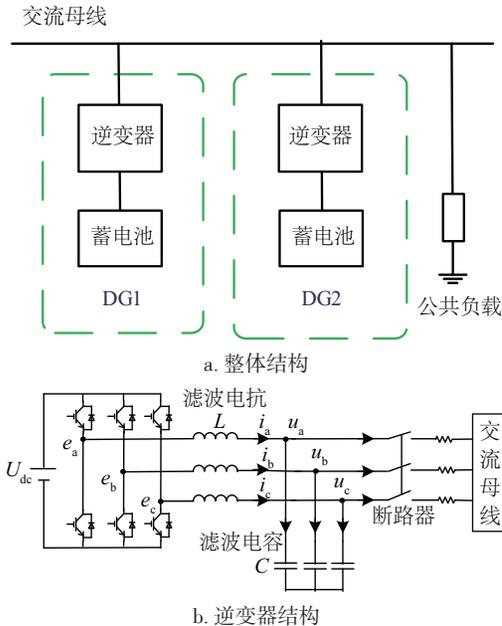


图 1 DG 并联系统结构图

Fig. 1 Structure of parallel DG system

1.2 蓄电池组模型

蓄电池是一个具有复杂结构的电化学单元,其等效电路模型也具有多种形式^[12,13]。本文采用电池单元模型为戴维南电路等效结构,如图 2 所示,图中 R_{bat} 为蓄电池等效内阻, E_{bat} 为蓄电池空载电动势, V_{bat} 为输出电压, i_{bat} 为输出电流。具有多个电池单元的电池组数学模型则可用单个模型电池等效串并联获得。

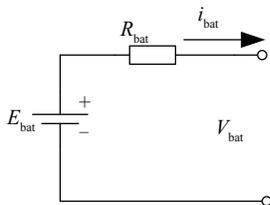


图 2 单个电池模型

Fig. 2 Model of each battery

电池模型中输出阻抗为纯阻性电阻 R_{bat} ,受控电压源电压 E_{bat} 与 SOC 之间存在非线性关系,如图 3 所示。

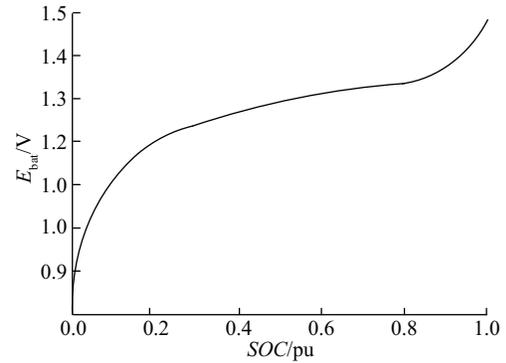


图 3 E_{bat} 与 SOC 关系曲线

Fig. 3 Relation curve between E_{bat} and SOC

根据文献[13]给出的控制算法,通过数学模型对图 3 中的关系进行曲线模拟,有:

$$E_{bat} = E_0 - \frac{K}{SOC} + A \exp[B(SOC - 1)] \quad (1)$$

式中, E_0 —— 电池空载电压; K 、 A 、 B —— 电池模拟参数,需要通过实验测试获得。

SOC 采用式(2)进行估计:

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{Q_{bat}} \int i_{bat} dt \quad (2)$$

式中, SOC_0 —— 初始荷电状态; Q_{bat} —— 电池容量。

本文选择的单个电池参数,如表 1 所示。

表 1 单个电池参数

Table 1 Parameter of each cell

$Q_{bat}/A \cdot s$	E_0/V	R_{bat}/Ω	K	A	B
3600	1.3	0.005	0.02	0.15	0.03

2 改进型下垂控制策略

2.1 传统下垂控制介绍

DG 中逆变器以电压源模式运行,图 1 中并联系统等效运行电路如图 4 所示^[4]。

其中, $U_i \angle \varphi$ 为 DG 的等效输出电压,下标 $i=1, 2$ 代表 DG 编号,下同。 $E \angle 0^\circ$ 为交流母线电压, X_i 为 DG 等效输出阻抗和线路阻抗之和,可近似为纯感性,从而得到 DG 输出功率为:

$$P_i = \frac{U_i E \sin \varphi_i}{X_i} \approx \frac{U_i E}{X_i} \varphi_i \quad (3)$$

$$Q_i = \frac{U_i E \cos \varphi - E^2}{X_i} \approx \frac{E}{X_i} (U_i - E)$$

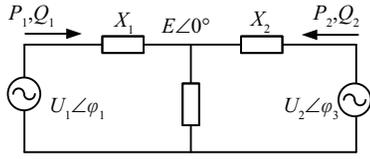


图4 系统等效模型

Fig. 4 Equivalent system model

传统下垂控制的主要思想是,各 DG 单元按照相同的频率-有功,电压-无功的下垂曲线获取自身的输出电压的频率和幅值,从而控制各自的输出功率,下垂曲线可分别由式(4)、式(5)描述:

$$\begin{aligned} \omega_i &= \omega_0 - m_0 P_{ie} \\ U_i &= U_0 - n_0 Q_{ie} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, ω_0 、 U_0 ——空载频率和空载电压幅值; ω_i 、 U_i ——指令端口电压频率和幅值; m_0 、 n_0 ——有功和无功下垂系数; P_{ie} 、 Q_{ie} ——DG 的检测有功和无功输出。

由瞬态功率经过低通滤波器得到,有:

$$\begin{aligned} P_{ie} &= \frac{1}{T_S + 1} P_i \\ Q_{ie} &= \frac{1}{T_S + 1} Q_i \end{aligned} \quad (5)$$

式中, T ——滤波器时间常数; P_i 、 Q_i ——瞬态功率计算值。

瞬态功率计算值的计算公式为:

$$\begin{aligned} P_i &= u_{ia} i_{ia} + u_{ib} i_{ib} + u_{ic} i_{ic} \\ Q_i &= [(u_{ia} - u_{ib}) i_{ic} + (u_{ib} - u_{ic}) i_{ia} + (u_{ic} - u_{ia}) i_{ib}] / \sqrt{3} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, u_{ia} 、 u_{ib} 、 u_{ic} ——DG 端口相电压; i_{ia} 、 i_{ib} 、 i_{ic} ——DG 端口相电流。

2.2 改进型下垂控制

采用传统下垂控制的 DG 能够实现输出功率均衡^[4],但在储能变流器控制中, SOC 均衡控制同样重要。根据式(2)可知,若蓄电池组初始 SOC 不一致,即使放电功率和储能容量完全相同, SOC 差值也始终存在。为了实现 SOC 均衡,本文提出改进型下垂控制策略,其控制方程为:

$$\begin{cases} \omega_i = \omega_0 - \frac{m_0}{SOC_i} (P_{soc} + P_{ie}) \\ U_i = U_0 - n_0 Q_{ie} \end{cases} \quad (7)$$

式中, P_{soc} ——SOC 控制功率; SOC_i ——DG 当前 SOC 值。由于无功输出不影响 SOC,故无功-电压表达式不变。对比式(4)、式(7)可发现,改进型下垂控制相当于同时改变了传统下垂算法的空载频

率和下垂斜率, SOC 越低,则空载频率越低,下垂系数也越大。为详细分析改进型下垂控制中各单元功率输出状态,将式(7)中的有功下垂公式重写为两机形式,稳态下两机输出频率相同,有:

$$\omega = \omega_0 - \frac{m_0}{SOC_1} (P_{soc} + P_{2e}) = \omega_0 - \frac{m_0}{SOC_2} (P_{soc} + P_{2e}) \quad (8)$$

当负荷恒定时,有:

$$P_{1e} + P_{2e} = P_L \quad (9)$$

式中, P_L ——两机总带载功率。

求解式(8)、式(9)得到:

$$\begin{cases} P_{1e} = \frac{SOC_1}{\sum SOC} P_L + \frac{\Delta SOC}{\sum SOC} P_{soc} \\ P_{2e} = \frac{SOC_2}{\sum SOC} P_L - \frac{\Delta SOC}{\sum SOC} P_{soc} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\Delta SOC = SOC_1 - SOC_2$; $\sum SOC = SOC_1 + SOC_2$ 。

式(10)表明,改进型下垂控制中,各 DG 输出有功功率不仅取决于 P_L ,同时与 P_{soc} 以及自身 SOC 相关,而传统下垂控制只能控制输出有功功率相同。图 5 给出了带载状态下 2 种控制算法的对比图示,其中 1 号机 SOC 大于 2 号机,图 5a 中传统下垂控制中两机下垂曲线重合,输出功率也相同,图 5b 中改进型下垂控制的 1 号机下垂曲线的斜率小于 2 号机,空载频率则大于 2 号机,由于稳定状态下两机输出频率相同,1 号机输出功率也大于 2 号机,在储能容量相同的情况下,1 号机 SOC 下降速度快于 2 号机,因此两机 SOC 逐渐接近。

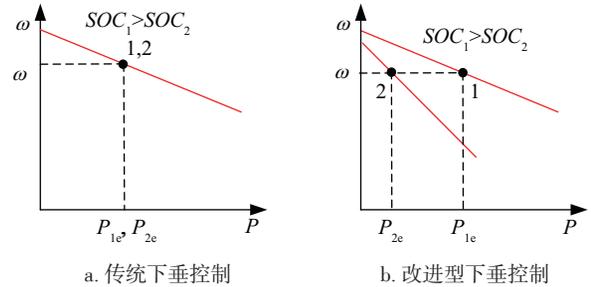


图5 2种控制策略对比分析

Fig. 5 Analysis of two different control strategy

当两机 SOC 不相同,其均衡过程可由 ΔSOC 的时域表达式反映,首先对式(10)左右分别相减得到:

$$\Delta P = \frac{\Delta SOC}{\sum SOC} P_L + \frac{2\Delta SOC}{\sum SOC} P_{soc} \quad (11)$$

式中, $\Delta P = P_{1e} - P_{2e}$,通常可认为 $P_L \geq 0$,若设置

$P_{soc} \geq 0$, 即可满足当 $\Delta SOC \geq 0$ 时保证有 $\Delta P \geq 0$ 。

根据式(2), 可推导出 ΔSOC 与 ΔP 之间存在式(12)所示的近似的微分关系:

$$\Delta P = -\frac{Wd\Delta SOC}{dt} \quad (12)$$

式中, W —— 电池组总容量, $W = n_{bat} E_{bat} Q_{bat}$, n_{bat} 为电池组包含电池个数。

当恒定负荷时有:

$$\Sigma SOC = \Sigma SOC_0 - \frac{P_L t}{W} \quad (13)$$

式中, ΣSOC_0 —— ΣSOC 初始值; t —— 充放电时间。

综合式(11)~式(13)并求解微分方程, 可得 ΔSOC 的时域表达式为:

$$\Delta SOC = \Delta SOC_0 \left(1 - \frac{P_L t}{\Sigma SOC_0 W}\right)^{\frac{P_L + 2P_{soc}}{P_L}} \quad (14)$$

式中, ΔSOC_0 —— ΔSOC 的初始值。

由于 $1 - \frac{P_L t}{\Sigma SOC_0 W}$ 在 $[0, 1]$ 之间且逐渐趋向 0, 只要 $P_L > 0$, ΔSOC_0 必然最终等于 0, 而当 $P_L = 0$ 时, 可对式(14)求极限得到:

$$\lim_{P_L \rightarrow 0} \Delta SOC = \Delta SOC_0 e^{-\frac{2P_{soc} t}{\Sigma SOC_0 W}} \quad (15)$$

此时 ΔSOC 表达式变为指数函数的形式, 若 $P_{soc} > 0$, 则 ΔSOC 会逐渐衰减, P_{soc} 越大则衰减速度越快, $P_{soc} = 0$ 则 ΔSOC 不发生变化, 两机 SOC 始终保持原先状态, $P_{soc} < 0$ 则 ΔSOC 不仅不衰减反而逐渐增大, 这显然是不能接受的, 因此必须保证 $P_{soc} \geq 0$ 。

根据上述改进型下垂控制的原理, 通过下垂算式得到电压指令 U 和频率指令 ω , 并通过频率积分得到相角指令 φ , 从而计算得到三相电压指令值 U_{abc}^* , 再经过电容电压外环电感电流内环的双闭环控制得到 PWM 信号, 图 6 为基于上述思想的改进型下垂控制系统控制框图。

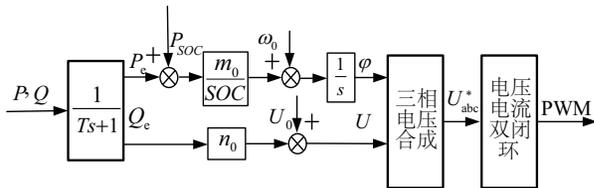


图6 改进型下垂控制框图

Fig. 6 Improved droop control strategy

3 稳定性分析

改进型下垂控制引入了改变了传统下垂曲线的斜率和空载频率, 其动稳态性能也将发生变化, 可通过建立小信号模型进行分析, 为简化分析条件, 将 PCC 点电压近似认为恒定值, 同时考虑到纯感性线路阻抗条件下有功无功控制环近似解耦^[4], 可忽略无功电压控制部分, 即将 U 也视为恒定值, 最后, 由于电压闭环控制的带宽远快于 SOC 及功率调节带宽, 可将实际输出电压直接等效为电压给定值。将式(3)、式(5)、式(7)、式(12)转换到 s 域并进行微偏线性化得到:

$$\begin{cases} \hat{P} = \frac{UE}{X} \hat{\varphi} \\ \hat{P}_e = \frac{1}{Ts+1} \hat{P} \\ \hat{\omega} = \frac{m_0(P_{soc} + P_e)}{SOC^2} \hat{SOC} - \frac{m_0}{SOC} \hat{P}_e \\ \hat{SOC} = -\frac{1}{Ws} \hat{P} \end{cases} \quad (16)$$

联立式(17)各项同时考虑到 $\hat{\omega} = s\hat{\varphi}$, 即可建立控制系统特征方程为:

$$TWs^3 + Ws^2 + (ABT + ACW)s + AB = 0 \quad (17)$$

式中, $A = \frac{UE}{X}$; $B = \frac{m_0(P_{soc} - P_e)}{SOC^2}$; $C = \frac{m_0}{SOC}$ 。

控制系统为 3 阶系统, 可通过特征方程根判断其动稳态性能, 采用表 2 中的参数并结合式(17), 计算即可得到控制系统 3 个特征根。由于 SOC 取决于电池组放电状态, P_{soc} 为控制系统参数, 均为可变量, 重点分析其数值变化对系统根轨迹的影响, 如图 7 所示。图 7a 中, 随着 SOC 增加, 实轴极点 p_1 逐渐靠近原点, 调节速度变慢, 但不会越过虚轴, 系统依然能维持稳定, p_{23} 为共轭极点逐渐远离实轴, 系统阻尼减小振荡增加, 图 7b 中, 随着 P_{soc} 增加, p_1 逐渐远离原点, p_{23} 靠近极点但幅度非常小。进一步分析发现, p_1 主要影响 SOC 均衡性能, 而 p_{23} 主要影响 DG 输出功率, 因此图 7 对控制系统设计具有指导性意义, 在设计系统时, 首先保证在蓄电池下限 SOC 处具备合适的阻尼, 同时选取 P_{soc} 以得到适合的 SOC 均衡速度指标。以本文设计为例, 取 SOC 下限 0.2, 计算各极点分别为 $p_1 = 1.28$, 对应时间常数 0.8 s, $p_{23} = -11.27 \pm j25.31$, 对应阻尼比 0.41, 自然振荡频率 27.71, 控制系统各项性能指标均在可接受范围。

表2 特征方程参数

Table 2 Parameter of characteristic equation

参数	数值	参数	数值
电池组容量 $W/W \cdot s$	3×10^6	输出线电压 U/V	385
下垂系数 $m/$ $\text{rad} \cdot (\text{s} \cdot \text{W})^{-1}$	1×10^{-5}	交流母线线 电压 E/V	381
空载角频率 $\omega_0/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	314	输出阻抗 X/Ω	0.3
滤波时间常数 T/s	0.1	额定功率 P_s/W	5×10^4

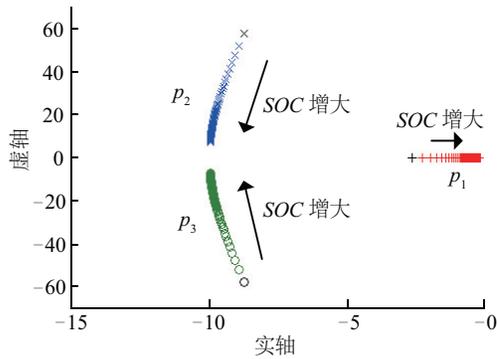
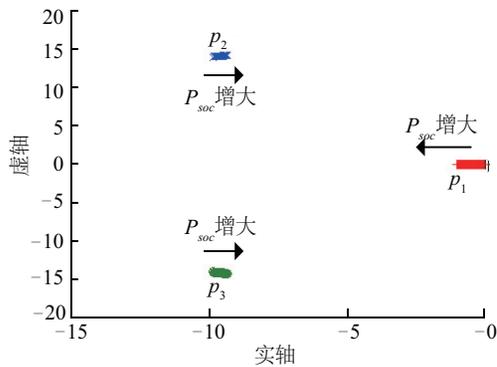
a. $0.05 \leq \text{SOC} \leq 1, P_{\text{soc}} = 1 \times 10^5$ b. $1 \times 10^4 \leq P_{\text{soc}} \leq 2 \times 10^5, \text{SOC} = 0.5$

图7 控制系统根轨迹图

Fig.7 Root locus plot of control system

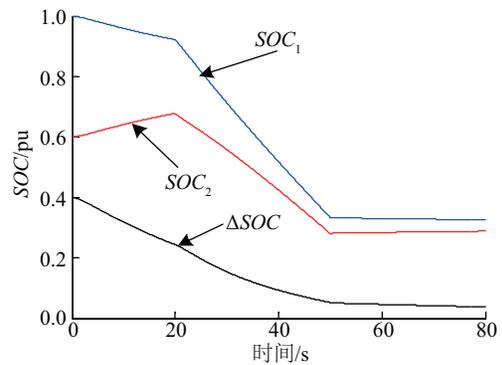
4 仿真和实验

为验证本文提出算法的正确性,利用 Matlab/Simulink 搭建如图 1a 所示的仿真平台,其中 DG 额定功率 100 kW,开关频率 5 kHz,滤波电感为 0.25 mH,滤波电容为 270 μF ,储能电池容量为 $3 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{s}$,线路阻抗和其他控制参数同表 2。

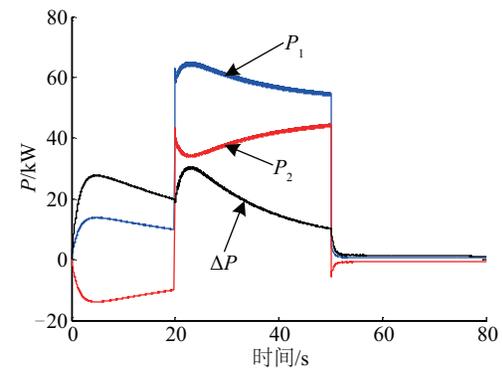
算例 1:不同负荷下仿真

对各种负载状态下 SOC 均衡效果进行仿真验证,初始时 $\text{SOC}_1 = 1, \text{SOC}_2 = 0.6$,两机并联空载运

行,20 s 时增加 100 kW 阻性负荷并在 45 s 时将其切除,如图 8 所示。从仿真结果看,空载时 DG_1 输出正有功 SOC_1 下降, DG_2 则吸收有功 SOC_2 上升,负载投切后,两机均为负荷供电但 DG_1 输出功率大于 DG_2 ,负荷切出后 DG_1 继续向 DG_2 输出功率,两机 SOC 持续接近,总结仿真结果表明:1) 负荷状态 SOC 均衡速度快于空载状态;2) 空载状态下, SOC 差异较大时均衡速度大于差异较小时;3) 无论哪种状态 ΔSOC 始终逐渐缩小,仿真结果与理论分析基本保持相符。



a. SOC



b. P

图8 变化负荷下 SOC 均衡控制波形

Fig.8 Waves of SOC balance control with changed load

算例 2:不同 P_{soc} 下仿真

在空载状态下选取不同的 P_{soc} 进行仿真,两机 SOC 初始同算例 1,图 9 为 ΔSOC 和 ΔP 波形。仿真结果表明, P_{soc} 选取越大,调节开始时 ΔP 越大, ΔSOC 缩小速度越快,这也验证了上文的分析,虽然增大 P_{soc} 有利于提高动态均衡速度,但受限于逆变器额定功率, P_{soc} 实际取值必须综合考虑。

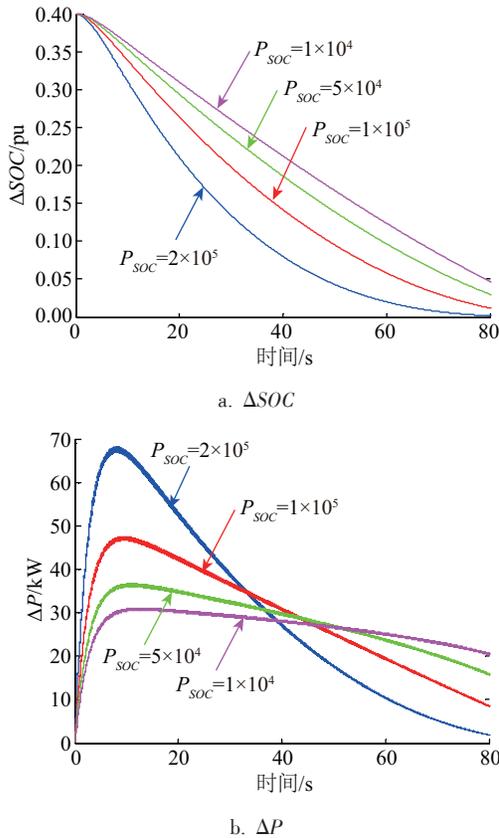


图9 不同 P_{soc} 仿真

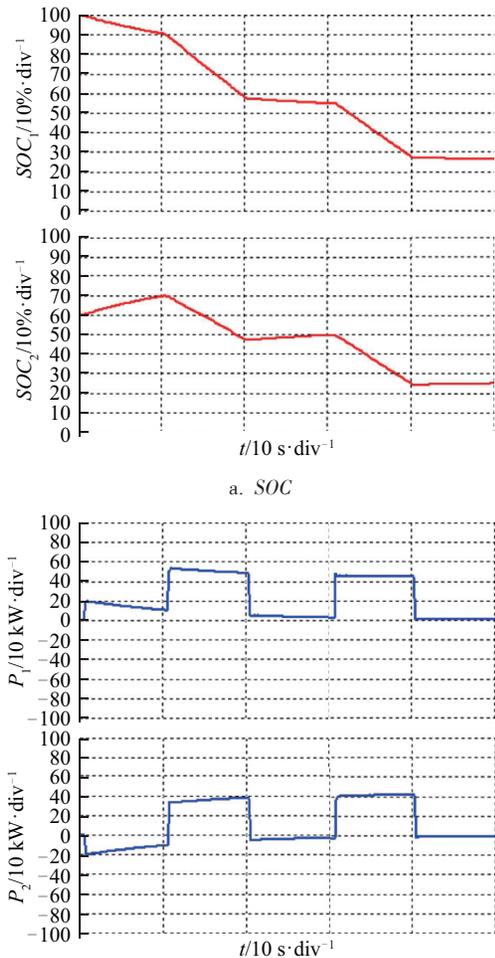
Fig. 9 Simulation result with different P_{soc}

为进一步验证理论分析和仿真结果的有效性,搭建了 100 kW 的独立微电网平台进行实验验证,图 10 为微网实验平台,包含 2 台 100 kW 蓄电池模拟器、2 台 100 kW 三相逆变器以及 100 kW 负载柜。DG₁中初始 SOC_1 为 1, DG₂中初始 SOC_2 为 0.6,其余参数与仿真参数相同,实验工况为约每 20 s 对负荷进行投切,记录数据通过通讯传送至上位机显示。图 11 验证各种负荷情况下,本文所提的控制方案均可实现 SOC 的多机均衡。



图10 微网实验平台

Fig. 10 Microgrid experimental platform



b. 有功功率

图11 负荷投切实验波形

Fig. 11 Experiment result during load variations

图 12 为稳态带载状态下母线线电压和两机输出电流波形,其中输出电压 THD 仅为 1.3%,电流不平衡度仅为 2.1%,波形良好。

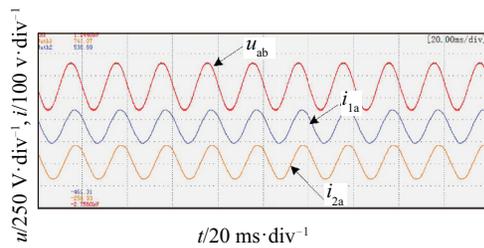


图12 负荷电压和输出电流波形

Fig. 12 Waves of load voltage and output current

5 结论

本文对 DG 并联带载运行时的控制策略进行研究,结论如下:

1)传统下垂策略仅能实现功率均分,无法实现SOC均衡,而本文提出的改进型下垂控制算法,通过改变下垂系数和初始频率,可在功率均衡的基础上协调各单元SOC趋同,且无需互联线。

2)通过求解均衡算式得到SOC差值的时域解析结果,结果表明无论是空载还是带载状态,均可实现SOC差值逐渐衰减至零。

3)SOC减小或 P_{soc} 增大均有利于提高SOC均衡速度,但SOC越小系统阻尼越小,震荡越严重,而 P_{soc} 增加对系统稳定性影响不大。

4)建立Matlab/Simulink仿真模型,对文中提出的相关控制策略开展仿真研究,并在此基础上搭建一套完善的微网实验平台,仿真和实验结果都验证文中提出的控制策略的有效性。

[参考文献]

- [1] 王成山,李鹏.分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J].电力系统自动化,2010,34(2):10—14.
- [1] Wang Chengshan, Li Peng. Development and challenges of distributed generation, the microgrid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10—14.
- [2] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等.微电网技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):57—70.
- [2] Yang Xinfu, Su Jian, Lyu Zhipeng, et al. Overview on microgrid technology[J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(1): 57—70.
- [3] 谢玲玲,时斌,华国玉,等.基于改进型下垂控制的分布式电源并联控制技术[J].电网技术,2013,37(4):992—998.
- [3] Xie Lingling, Shi Bin, Hua Guoyu, et al. Parallel operation technology of distributed generations based on improved droop control[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 992—998.
- [4] 吕志鹏,罗安.不同容量微源逆变器并联功率鲁棒控制[J].中国电机工程学报,2012,32(12):35—41.
- [4] Lyu Zhipeng, Luo An. Robust power control of paralleled micro-source inverter with different power ratings[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(12): 35—41.
- [5] 赵兴勇,杨涛,王灵梅.基于复合储能的微电网运行方式切换控制策略[J].高电压技术,2015,41(7):2142—2147.
- [5] Zhao Xingyong, Yang Tao, Wang Lingmei. Control strategy for operation modes transfer of micro-grid based on hybrid energy storage system[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2142—2147.
- [6] 马艺玮,杨苹,陈思哲,等.含柴油发电机和蓄电池储能的独立微电网频率分层控制[J].控制理论与应用,2015,32(8):1098—1105.
- [6] Ma Yiwei, Yang Ping, Chen Sizhe, et al. Frequency hierarchical control for islanded micro-grid consisting of diesel generator and battery energy storage system[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(8): 1098—1105.
- [7] Li Chendan, Dragicevic T, Plaza M G, et al. Multiagent based distributed control for state-of-charge balance of distributed energy storage in DC microgrids[A]. IECON 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society[C], Dallas, American, 2014.
- [8] Lu Xiaonan, Sun Kai, Guerrero J M. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(6): 2804—2815.
- [9] Lu Xiaonan, Sun Kai, Guerrero J M. Double-quadrant state-of-charge-based droop control method for distributed energy storage systems in autonomous DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 147—157.
- [10] Shafiee Q, Dragičević T, Vasquez J C, et al. Hierarchical control for multiple DC-microgrids clusters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 922—933.
- [11] Kakigano Hiroaki, Miura Yushi, Ise Toshifumi. Distribution voltage control for DC microgrids using fuzzy control and gain-scheduling technique[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2246—2258.
- [12] 荆龙,黄杏,吴学智.改进型微源下垂控制策略研究[J].电工技术学报,2014,29(2):146—152.
- [12] Jing Long, Huang Xing, Wu Xuezhi. Research on improved microsource droop control method[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 29(2): 146—152.
- [13] Tremblay O, Dessaint L A, Dekkiche A I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles[A]. IEEE Vehicle Power & Propulsion Conference[C], Arlington, American, 2007.

IMPROVED DROOP CONTROL BASED ON STATE OF CHARGE BALANCE IN PARALLEL DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS

Hu Chao¹, Zhang Xing¹, Shi Rongliang¹, Liu Fang¹, Xu Haizhen¹, Cao Renxian²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Sungrow Power Supply Co. Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: In parallel distributed generation (DG) system, traditional droop control can share the load power, but can't balance the state of charge (SOC) of each unit. This paper presents an improved droop control strategy, the droop curve is changed by designing variable droop coefficient and introducing SOC power reference unit, causing the converter with higher SOC delivering energy to the one with lower SOC, then the SOC of the two modules will be balanced, and the power share ability and no communicated line of the traditional droop control are both retained. The analysis answer of SOC balance is gained by solving the differential equation in two DG paralleled system. The performance of system is analyzed by establishing the two order control model. Finally the proposed strategy is validated with 100 kVA parallel DG system.

Keywords: distributed generation; state of charge; droop control; energy storage