

基于自适应调节的直流微电网储能系统设计

直流微电网系统中的分布式能源具有间歇性和不稳定性，其中普遍接入了储能设备，起到平衡光伏和负载功率，稳定直流母线电压等作用。传统的解决方案多用下垂控制调节系统功率平衡，但会引起一定的电压降，不但影响系统调节范围，而且多储能设备并联时会引起环流等损耗。设计自适应调节下垂系数的双向DC/DC变换器，通过直流母线电压信号，在欠功率时提供功率，功率溢出时吸收功率，并维持电压恒定。实现直流微电网运行中对储能系统分布式优化控制。通过实验完成了上述控制目标，验证了控制策略的有效性。

陈玲艳¹ 范书豪² 段兵德¹ 董文娟¹ 张晓磊¹ / 1. 国网新疆电力公司电力科学研究院 2. 河南理工大学电气工程与自动化学院

0 引言

直流微电网结合了电源技术和储能技术，是把不可控的自然资源如太阳能、风能等可再生能源控制在一定范围内的微电网技术^[1-3]。其与交流微电网相比，直流微电网功率转换等级少，且不需要频率、相位控制，没有控制同步和谐波等问题，能更方便地接入储能设备维持系统稳定^[4-6]。由于上述优点，可以预期未来的电力系统中将会有越来越多的直流微电网。

直流微电网技术的关键在于储能系统如何平衡系统的光伏和负载功率，稳定系统直流母线电压。由于其分布式的连接方法，一般采用下垂控制方法，可实现储能系统的本地控制。文献[7]利用超级电容电压不能突变，对储能设备电流平滑过渡；文献[8]采用PI调节储能设

备电流使之跟随指定值；文献[9]采用基于SOC的自适应调节，实现多储能设备并联时的充放电管理。但由于下垂控制的固有特性，在控制过程中会产生电压降，严重时限制了系统功率调节范围。

本文设计了基于自适应调节的双向DC/DC变换器，以分布式连接的方式应用于直流微电网储能控制系统，通过直流母线电压信号，在欠功率时提供功率，功率溢出时吸收功率，克服了传统调节时的电压降问题，并兼顾蓄电池的充电。最后通过实验验证了控制策略的有效性。

1 系统结构和原理

直流微电网主要由分布式微源（Distributed Generators, DG）和储能单元（Energy Storage Units, ESU）以及直流负载构成，如图1所示。光伏与负载的功率是随时变化的，此时就需要储能系统通过双向DC/DC变换器对系统提供或吸收功率。本文主要研究双向DC/DC变换器在直流微电网ESU中的实际应用，对光伏DC/DC的MPPT控制不作论述。

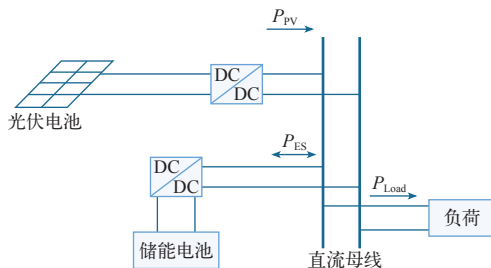


图1 直流微电网示意图

1.1 电压下垂稳压原理

图1中， P_{PV} 为光伏电池的输出功



陈玲艳/高级工程师

关键词/Keywords

直流微电网 ·
光伏 ·
功率 ·
DC/DC变换器 ·
自适应调节 ·

国家自然科学基金项目（51405137）；河南省科技攻关计划（082102240008）。

率； P_{ES} 为混合储能系统的输出功率； P_{Load} 为负荷功率。

直流母线的功率平衡方程为

$$P_{ES} = P_{Load} - P_{PV} \quad (1)$$

设DC/DC变换器1两端的电压为 U_{dc} ，其注入电网电流为 I_{ES} ，直流母线基准电压为 U_{dc-ref} ，则

$$I_{ES} = \frac{P_{ES}}{U_{dc}} = \frac{P_{Load} - P_{PV}}{U_{dc}} \quad (2)$$

直流母线电压与负荷和光伏功率差额之间存在下垂关系，即

$$U_{dc} = U_{dc-ref} - \beta(P_{Load} - P_{PV}) \quad (3)$$

式中， β 为功率下垂系数； U_{dc-ref} 为负荷与光伏功率相等时的母线电压。式(3)可变为

$$P_{Load} - P_{PV} = \frac{U_{dc-ref} - U_{dc}}{\beta} \quad (4)$$

由式(2)、式(4)可得

$$I_{ES} = \frac{U_{dc-ref} - U_{dc}}{\beta U_{dc}} \approx \frac{U_{dc-ref} - U_{dc}}{\beta U_{dc-ref}} = m(U_{dc-ref} - U_{dc}) \quad (5)$$

式中， m 为电压下垂系数。故可采用下垂控制来稳定直流母线电压。通过合理的 k 取值，根据式(5)计算出 I_{ES} 的给定值，再经过电流环使其实际值跟随给定值，就能使 U_{dc} 稳定在 U_{dc-ref} 附近的 U_{dc0} 。

1.2 改进型的电压下垂控制

对式(5)求其反函数可得

$$U_{dc} = U_{dc-ref} - mI_{ES} \quad (6)$$

由于直流母线电压即 U_{dc-ref} 不变，故当 P_{ES} 变化时， I_{ES} 会改变，由式(6)表明会导致 U_{dc0} 波动，现以图2阐述其电压下降后恢复到额定值的原理：当微电网所需 P_{ES} 增大时，导致 I_{ES} 增大，假设此时储能系统工作于A点，当 I_0 增加到 I_1 时， U_{dc0} 减小到

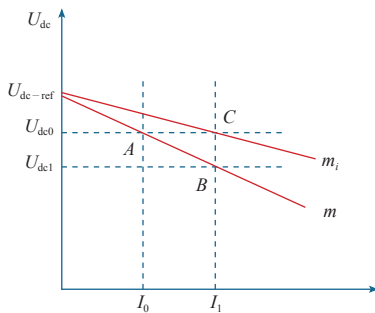


图2 自适应调节示意图

U_{dc1} ，系统将工作于B点，此时适当调节下垂系数 m 可将工作点调至C点，实现电压调节的无静差^[10]。

为实现当电流 I_{ES} 变化时 U_{dc0} 的无静差，现将下垂系数 m 改为具有自适应调节能力的 m_i 。由式(6)可以推导出有关 m_i 的方程，即

$$\begin{cases} m_i = \frac{U_{dc-ref} - U_{dc0}}{I_1} \\ U_{dc} = U_{dc-ref} - m_i I = U_{dc-ref} - \frac{U_{dc-ref} - U_{dc0}}{I_1} I_{ES} \end{cases} \quad (7)$$

对双向DC/DC变换器的电压下垂控制无静差调节过程如下。当所需储能系统功率 P_{ES} 增大时， I_{ES} 开始增大， m_i 不变（ m_i 根据 Δt 时间后的 I_{ES} 计算得到），根据下垂控制方程，此时 U_{dc} 开始减小；当 Δt 后， I_{ES} 继续增大， m_i 开始减小，此时 U_{dc} 继续减小；当 m_i 减小到某一程度时， U_{dc} 开始增大；一段时间后，当 I_{ES} 增大到稳定值后， m_i 继续减小，直至 Δt 后， U_{dc} 增至 U_{dc0} 。

2 系统能量管理及控制策略

对于直流微电网储能系统，主要的功率输入来自PV（光伏）功率和ESU功率，功率由负载消耗。此三者都接入了系统直流母线，为了维持系统的稳定运行，需直流母线电压保持在一定范围内。在微电网运行过程中，PV功率往往会随着环境如阳光、温度等自然条件的变化而变化，负载功率随用户需求随机变化，故PV功率与负载功率的差额也是变化的。此时，如果由ESU功率补足差额（差额为正时发出功率，差额为负时吸收功率），将可以稳定直流母线电压，保持微电网系统的稳定运行。具体的能量管理策略如图3所示，通过采样器检测负载功率和PV功率，使前者与后者做差后输入控制器，根据上节所提出的自适应下垂控制原理，调节ESU功率输出占空比，稳定直流母线电压。

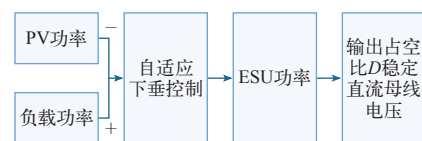


图3 系统的能量管理策略图

记光伏功率 P_{PV} 与负载功率 P_{Load} 的差额为 P_{ES} ，由上节所提控制原理可知，直流母线电流 I_{ES} 与此功率差额 P_{ES} 、电压 U_{dc} 相关，取初始下垂系数 m ，由下垂控制原理计算出 I_{ES} 的给定值，再经过电流环使其实际值跟随给定值，通过PI调节，PWM调制，输出占空比 D 的PWM波调节电压 U_{dc} ，此时 U_{dc} 与基准电压 U_{dc-ref} 存在静差。重复这一过程，代入由自适应改变后的下垂系数 m_i 值，可达到直流母线电压无静差控制。具体储能系统变换器控制策略如图4所示。

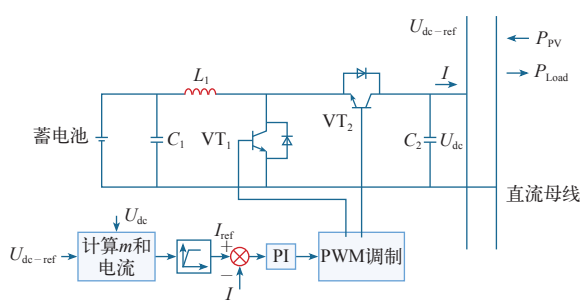


图4 储能DC/DC控制策略

3 系统软硬件设计

直流微电网储能系统主要应用DSP控制，应用了DSP的事件管理器EVA/B、阴影寄存器等，具体软件主程序和中断程序如图5所示。首先各模块初始化，等待启动命令，初始化A-D采样，对双向DC/DC变换器的电压电流采样，通过自适应运算，选取合适的下垂系数 m_i ，通过事件管理器输出合适占空比的PWM波，利用阴影寄存器实现立即

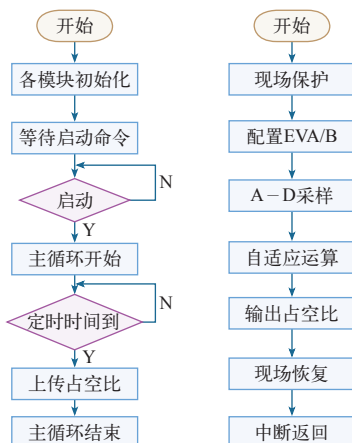


图5 软件主程序和中断程序

写入功能控制占空比，实现对电流的控制。系统工作频率为25 kHz，即每个调节周期为40 μ s，系统继续运行，每个周期改变下垂系数 m_i ，通过数个周期运行，最后达到系统下垂控制的无静差，此时程序结束。

为了验证控制策略的有效性，设计输出功率为24 W、电流范围为0~1 A，电压范围为0~24 V以及工作频率为25 kHz的双向DC/DC变换器。具体硬件设计选型如下表所示，根据硬件要求设计制作了储能系统双向DC/DC变换器如图6所示。控制电路主要由DSP及其外围电路、采样电路、驱动电路和故障检测电路组成。使用霍尔电流传感器WCS1800和电压传感器CHV-25P分别检测电流和电压，运用TMS320F2812作为控制器，对系统工作状态进行检测，运算后输出合适占空比的PWM波，控制储能系统输出/吸收功率，从而使微电网系统欠功率时提供功率，功率溢出时吸收功率，并稳定直流母线电压。

表 硬件选择

L_1	C_1, C_2	VT_1, VT_2	电流传感器	电压传感器
1.2 mH	470 μ F	IRFP250	WCS1800	CHV-25P

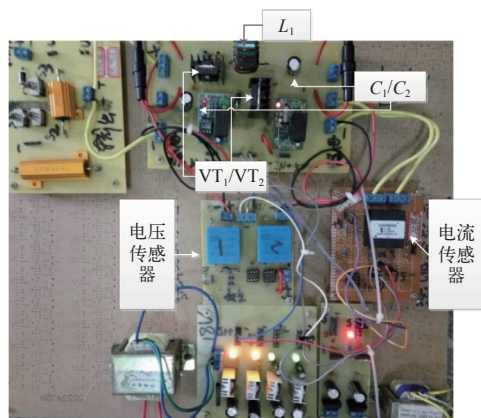


图6 储能系统DC/DC变换器

4 实验结果

对直流微电网储能系统的控制，本质上是对储能系统接入直流母线的DC/DC变换器进行控制。由上文可知，影响直流母线电压的主要因素为PV功率、负载功率和ESU功率，而对DC/DC变换器直接产生影响的是负载功率与PV功率的差

值。为了简化实验,利用直流电源模拟恒定的PV功率输出,不仅改变负载功率的大小也可达到验证控制策略的目的。如图7所示,模拟PV输出电压 $U=24\text{ V}$ 。



图7 模拟恒定的PV输出电压

图8为ESU双向DC/DC变换器工作时门极触发脉冲波形图。开关频率为25 kHz,即每个调节周期为40 μs。该储能变换器有两种工作模式:模式一,负载功率大于 P_{PV} 时,即 P_{ES} 为正时,DC/DC变换器工作于boost模式,储能系统发出功率;模式二,负载功率小于 P_{PV} 时,即 P_{ES} 为负时,储能变换器工作于buck模式,储能系统吸收功率。

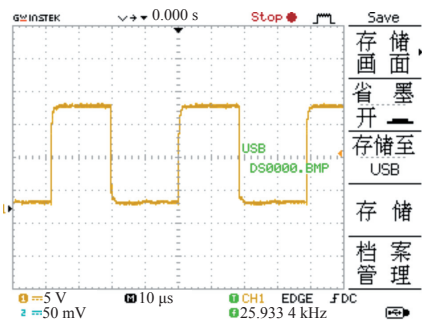
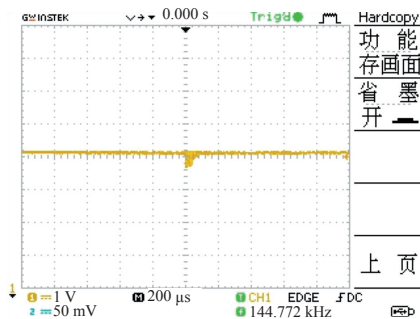


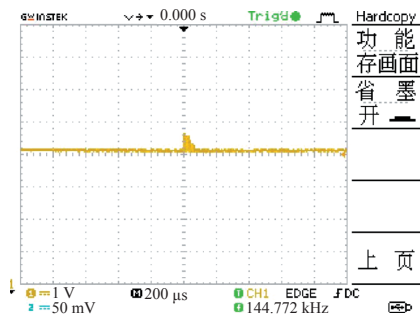
图8 门极触发脉冲

现分别增大负载功率和减小负载功率,使储能系统DC/DC变换器工作于模式一和模式二,观察ESU输出电压即直流母线电压变化状况。图9为ESU输出电压波形图。其中输出电压为24 V,电流为1 A。图9a中, P_{PV} 和 P_{Load} 于零时刻发生变化,负载 P_{Load} 增大5%, P_{PV} 与 P_{Load} 的差值增大时,根据下垂控制原理,出现电压降,此时电压变化率约为3%。第一个周期时, I_{ES} 开始增大,此时 m 不变,根据下垂控制方程,此时 U_{dc} 开始减小;当1个周期后, I_{ES} 继续增大, m 开始减小,此时 U_{dc} 继续减小

到最小值, U_{dc} 开始增大;4个周期后,当 I_{ES} 增大到稳定值后, m 继续减小,直至4个周期后, U_{dc} 增至24 V。根据所提出的新控制原理,调节下垂系数,电压恢复到正常值。同理,图9b中, P_{PV} 和 P_{Load} 于零时刻发生变化, P_{PV} 与 P_{Load} 的差值减小同样值时,调节下垂系数,电压恢复到正常值。



(a) 系统功率差值增加时DC/DC输出电压波形图



(b) 系统功率差值减少时DC/DC输出电压波形图

图9 ESU自适应调节输出电压

5 结束语

在直流微电网运行中,ESU传统下垂控制方法的基础上,提出了应用自适应调节的直流微电网控制策略,一定程度上解决了直流微电网运行过程中负荷变化与控制范围间的矛盾。制作双向DC/DC变换器,应用新的控制策略,通过实验验证,证明ESU系统可以在直流微电网欠功率时提供功率,功率溢出时吸收功率,并克服了传统调节时的电压降问题,验证了该方法的可行性和有效性。

参考文献

- [1] Shi-Ming Chen, Tsorng-Juu Liang, Ke-Ren Hu.

(下转第25页)

- 微电网经济运行模型 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (25): 52-59.
- [4] 罗毅, 刘明亮. 计及风险备用约束的孤网系统环保经济调度 [J]. 电网技术, 2013, 37 (10): 2705-2711.
- [5] 石庆均, 江全元. 包含蓄电池储能的微网实时能量优化调度 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33 (5): 76-82.
- [6] 沈玉明, 胡博, 谢开贵, 等. 计及储能寿命损耗的孤立微电网最优经济运行 [J]. 电网技术, 2014, 38 (9): 2371-2378.
- [7] Logenthiran T, Srinivasan D, Shun T Z. Demand side management in smart grid using heuristic optimization [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3 (3): 1244-1252.
- [8] 李颖浩, 郭瑞鹏. 基于广义Benders分解的启发式机组组合优化 [J]. 电网技术, 2012, 36 (3): 179-183.
- [9] 王彩霞, 鲁宗相. 风电功率预测信息在日前机组组合中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (7): 13-18.
- [10] 高红均, 刘俊勇, 魏震波, 等. 考虑风储一体的多场景两阶段调度决策模型 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34 (1): 135-140.
- [11] 李鹏, 李涛, 张双乐, 等. 基于混沌二进制粒子群算法的独立微网系统的微电源组合优化 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33 (12): 33-38.
- (收稿日期: 2016-02-10) **EA**

(上接第19页)

- Design, analysis, and implementation of solar power optimizer for DC distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (4): 1764-1772.
- [2] Dragi evi T, Guerrero J M, Vasquez J C, et al. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29 (2): 695-706.
- [3] Lie Xu, Dong Chen. Control and operation of a DC microgrid with variable generation and energy storage [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26 (4): 2513-2522.
- [4] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (19): 100-107.
- [5] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等. 直流微网研究中的关键技术 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (1): 98-106.
- [6] 石庆均, 江全元. 包含蓄电池储能的微电网实时能量优化调度 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33 (5): 76-82.
- [7] 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): 892-899.
- [8] 吴红斌, 顾细, 赵波清, 等. 蓄电池充放电管理的全过程仿真研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28 (8): 843-849.
- [9] Hongmei Zeng, Qiang Yang. Adaptive voltage regulation of islanding DC microgrid with multiple distributed PVs and storage units [C]. 27th Chinese Control and Decision Conference, 2015: 5528-5533.
- [10] 郑永伟, 陈民铀, 李闯, 等. 自适应调节下垂系数的微电网控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (7): 6-11.
- (收稿日期: 2016-11-21) **EA**