

# 一种多能源接入储能移动方舱的电压控制方法

叶海涵<sup>1</sup>, 陈武<sup>1</sup>, 郝文波<sup>2</sup>, 王长宝<sup>3</sup>, 侯凯<sup>3</sup>, 江小兵<sup>3</sup>, 胡秦然<sup>1</sup>

(1. 东南大学 电气工程学院(先进电能变换技术与装备研究所), 南京 210096;

2. 国网黑龙江省电力有限公司电力科学研究院, 哈尔滨 150030;

3. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 南京 211000)

**摘要:** 针对应急现场中重要负荷供电的高可靠性需求, 提出一种多能源接入储能移动方舱的拓扑与电压控制方法, 可促进现场多类型能源汇集与利用, 实现交直流母线电压稳定控制。采用直流母线分立、交流母线并联的方式防止重要负荷供电中断, 并提供了详细的主电路拓扑及参数设计; 直流母线采用分段下垂控制, 在系统额定运行时取消下垂控制的稳态静差, 在储能电池临近极限时充分调动外部能源以防止过冲、过放; 通过储能变换器的参考值自动更新可实现交流母线频率校正、外部新能源及内部储能电池优先供电, 并加入了SOC(荷电状态)均衡函数以避免应急保障系统电路重组; 柴油发电机仅作为热备用, 可提高重要负荷供电可靠性, 减小燃料运输负担。仿真结果验证了所提方案的有效性与可行性。

**关键词:** 应急电源; 可靠供电; 多源接入; 协调控制; 电能质量校正

文章编号: 1007-1881(2021)04-0072-10

DOI: 10.19585/j.zjdl.202104010

中图分类号: TM73

文献标志码: B

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## A Voltage Control Method of Energy Storage Mobile Shelter with Multiple Energy Access

YE Haihan<sup>1</sup>, CHEN Wu<sup>1</sup>, HAO Wenbo<sup>2</sup>, WANG Changbao<sup>3</sup>, HOU Kai<sup>3</sup>, JIANG Xiaobing<sup>3</sup>, HU Qinran<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering (Center for Advanced Power-conversion Technology and Equipment),

Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Heilongjiang Electric Power Research Institute, Harbin 150030, China;

3. State Grid NARI Group Co., Ltd. (State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd.), Nanjing 211000, China)

**Abstract:** For the requirement of high-reliability on key load in the emergency field, this paper proposes a topology and voltage control method of energy storage mobile cabin with multiple energy access, which can promote the collection and utilization of various in-field energy sources and control the stability of AC and bus voltage. A method of isolated DC bus and paralleled AC bus is employed to prevent interruption of power supply for the key load. Besides, a design scheme of main circuit topology and parameter is proposed. The DC bus adopts the segmented droop control, which cancels the static error of droop control under steady-state operation and mobilizes external energy to prevent overcharge or discharge when energy storage battery approaches the limit. The automatically updated reference of energy storage converter can realize the AC bus frequency correction and the power supply priority of external renewable and internal energy storage battery. SOC (state of charge) balance function is added to avoid circuit reorganization of emergency support system. The diesel generator is only used for hot standby, which can improve power supply reliability for key loads and reduce fuel transportation burden. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed scheme are verified by the simulation results.

**Keywords:** emergency power source; reliable power supply; multi-source access; coordinated control; power quality correction

## 0 引言

移动电源车作为车载式移动电站, 具备灵活

部署和临时供电的能力, 可有效减小供电中断或长时间停电对经济社会的影响, 在重大活动保障供电、配电网不停电检修、抢险救灾、野外生存等场合有广泛应用。其中, 储能移动方舱作为标准化、模块化、高强度的应急电源车具有良好的

海拔、温度、复杂道路机动适应性，有助于拓宽应急电源车的应用场景。

现有移动电源车的输出为三相四线制交流电压，一般不具备直流接口和即插即用功能，较难响应通信、计算机等新型负荷日益增长的供电需求。而且，现有移动电源车产品仅局限于单车运行，与应急现场可能存在的光伏、外部储能、柴油发电机以及不同功率等级与剩余容量的其他移动电源车相互独立，能量来源和运行方式单一，不具备多能源接入、多车并联与协调运行能力，无法构建完善、可靠的临时供电网络，也不便于后续移动电源车系列产品的多层次开发与扩展。因此，对移动电源车进行交直流供电、多源接入与协调运行、即插即用、高可靠性与高品质供电的研究具有重要意义。

针对应急现场可能涉及的多源接入<sup>[1-2]</sup>、电流均衡<sup>[3-4]</sup>、电压与频率恢复<sup>[5-6]</sup>问题，许多专家学者已经进行了深入研究。文献[7]采用电阻型下垂控制蓄电池以持续性按比例分担负荷功率，采用电容型下垂控制超级电容以输出暂态高频功率，但未涉及直流母线电压校正。文献[8]提出兼顾功率精确分配和直流母线电压无偏差的自适应下垂控制策略。文献[9]将母线电流作为补偿量进行二次调压，在功率均分的基础上恢复母线电压，减小线路损耗。文献[10-11]详细介绍了在包含光伏、储能、柴油发电机的微网中VSG(虚拟同步发电机)的设计方法。文献[12]在下垂控制的逆变器

中引入SOC(荷电状态)功率指令，可根据当前SOC线性调节输出功率。文献[13]在VSG有功指令的频率控制模块和SOC控制模块中加入自适应权重系数，用于在调节交流频率时防止储能过充过放，但频率调节速度缓慢。另外，上述文献仅涉及移动电源车多源接入与协调控制的直流侧或交流侧，整体拓扑过于简单，难以满足应急现场的高可靠用电要求，也缺乏一种简单、通用的系统参数设计方法。

本文首先分析适用于多源接入的基本拓扑，论证直流母线分立、交流母线互联的整体拓扑的合理性，并以电感电流或电容电压波动范围限制为统一参数设计依据，补足多变换器系统主电路参数设计的空缺。然后依次提出直流母线和交流母线控制方案：直流母线采用分段下垂方法，在系统额定运行时取消下垂控制的稳态静差，在储能电池临近极限时调动外部能源防止内部储能过冲过放；交流母线控制方案可实现频率实时校正、新能源及方舱内部储能电池优先供电、储能电池SOC均衡，有助于防止重要负荷供电中断、避免应急保障系统电路重组；柴油发电机仅作为热备用，可减少燃料运输负担。最后，通过仿真对所提方案的有效性进行验证。

## 1 拓扑结构

### 1.1 整体系统基本拓扑

整体系统的基本拓扑如图1所示。整体系统

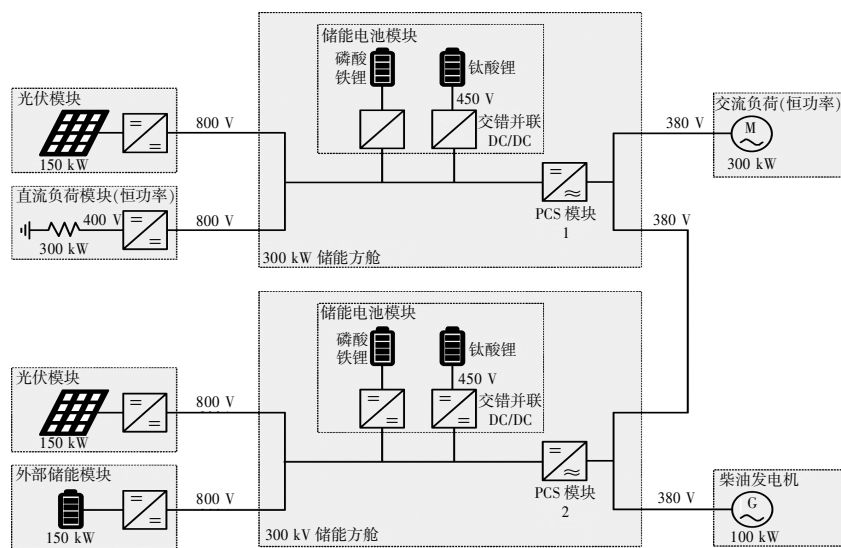


图1 整体系统的基本拓扑

由光伏模块、直流负荷模块、外部储能模块、两台相同的储能移动方舱、交流负荷和柴油发电机组组成, 每台储能移动方舱包含 200 kW/100 kWh 钛酸锂电池、200 kW/200 kWh 磷酸铁锂电池、两台交错并联 DC/DC、双向升压模块和 PCS(储能变流器)模块。

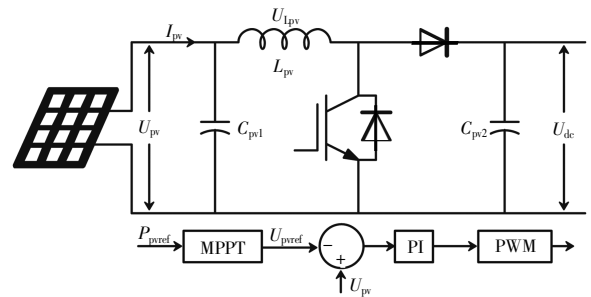
每台储能移动方舱提供两个直流接口和两个交流接口, 直流接口电压为 800 V, 分别连接光伏模块、直流负荷模块和外部储能模块; 交流接口线电压有效值为 380 V, PCS 模块 1 上方的交流接口连接交流负荷, PCS 模块 1 下方交流接口与 PCS 模块 2 上方的交流接口相连, PCS 模块 2 下方交流接口连接柴油发电机。其中, 光伏额定功率  $P_{\text{pvn}}=150$  kW, 恒功率直流负荷的额定功率  $P_{\text{dcln}}=300$  kW, 外部储能额定功率  $P_{\text{essn}}=150$  kW, 储能移动方舱额定功率  $P_{\text{vsgn}}=300$  kW, 恒功率交流负荷额定功率  $P_{\text{acln}}=300$  kW, 柴油发电机额定功率  $P_{\text{gen}}=100$  kW。另外, 本文不考虑储能电池模块内部拓扑、控制与均衡措施, 将其等效为单一储能电池与交错并联 DC/DC 级联。

考虑到储能移动方舱的抢险救灾、应急保障需求, 图 1 中的交流负荷为重要负荷, 因此将两台储能移动方舱的交流母线并联以提高交流供电可靠性, 确保单个方舱闭锁时交流供电不中断。此时若再将直流母线并联, 虽可增大储能移动方舱的等效功率, 但方舱间出现环流, 降低整体系统运行效率, 因此采用图 1 所示直流母线相互独立、交流母线并联的整体拓扑。另外, 考虑到交流负荷可能出现随机性增减, 且对供电质量较为敏感, 因此所提系统必须能在负荷突变时稳定运行, 且需要尽可能地提高交流供电质量。考虑到应急现场可能存在光伏、外部储能、柴油发电机等其他类型的电源, 因此所提系统必须具备多能源接入与协调运行的能力。考虑到柴油发电机高能耗、高污染、震动、噪音、红外特征明显, 且燃油运输困难, 因此所提方案尽可能采用现场新能源及方舱内部储能电池供电, 柴油发电机仅作为热备用, 以提高重要负荷供电可靠性, 减少燃料运输负担。考虑到光伏存在波动性、随机性, 外部储能与直流负荷可能在任意时刻接入与退出, 因此所提系统必须能在电源投退时实现整体系统协调稳定运行。考虑到重要负荷可能随机接入某

个储能移动方舱的交直流母线, 而各储能移动方舱的剩余容量与负荷水平可能不尽相同, 为防止重要负荷供电中断还需实现方舱间的 SOC 均衡。

## 1.2 光伏模块

光伏模块的拓扑和控制算法如图 2 所示。其中,  $P_{\text{pvref}}$  为光伏参考功率,  $I_{\text{pv}}$  为光伏电流,  $U_{\text{pvref}}$  和  $U_{\text{pv}}$  为光伏板的参考电压与测量电压,  $C_{\text{pv1}}$  和  $C_{\text{pv2}}$  为低压侧和高压侧滤波电容,  $L_{\text{pv}}$  和  $U_{\text{Lpv}}$  为滤波电感及其电压,  $U_{\text{dc}}$  为直流母线电压。



注: MPPT 为最大功率点跟踪; PI 为比例-积分控制; PWM 为脉冲宽度调制。

图 2 光伏模块拓扑和控制算法

光伏模块的变换器采用定电压控制的 boost 变换器。当  $U_{\text{pv}}$  降低时, 占空比减小, 由伏秒平衡可知  $L_{\text{pv}}$  的压降增大, 从而  $U_{\text{pv}}$  上升直至稳定于  $U_{\text{pvref}}$ 。MPPT 算法借鉴文献[14]。

$C_{\text{pv2}}$  的设计借鉴文献[15]。设计  $L_{\text{pv}}$  使输出功率波动不超过 10%, 具体过程见附录 A, 可表示为:

$$\begin{cases} L_{\text{pv}} \geq \frac{(U_{\text{dcn}} - U_{\text{pvref}}) U_{\text{pvref}}^2}{\Delta P_{\text{pvn}} U_{\text{dcn}} f_{\text{pv}}} \\ C_{\text{pv2}} = \left(1 - \frac{U_{\text{pvref}}}{U_{\text{dcn}}}\right) \frac{U_{\text{pvref}}}{8 L_{\text{pv}} \Delta U_{\text{dcn}} f_{\text{pv}}^2} \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $U_{\text{dcn}}$  为直流母线电压额定值;  $f_{\text{pv}}$  为光伏变换器开关频率;  $\Delta P_{\text{pvn}}=10\%P_{\text{pvn}}$  为光伏输出有功偏差范围;  $\Delta U_{\text{dcn}}$  为直流母线电压偏差范围。

GB/T 35727—2017《中低压直流配电电压导则》中规定: 1 500 V 以下电压等级的直流供电电压偏差范围为标称电压的  $-20\% \sim 5\%$ , 因此  $\Delta U_{\text{dcn}}=5\%U_{\text{dcn}}$ 。

图 1 中直流负荷模块、外部储能模块设计与光伏模块类似, 详见附录 A。

## 1.3 双向 DC/DC 变换

储能移动方舱中交错并联 DC/DC<sup>[16]</sup>的拓扑和控制算法如图 3 所示。其中,  $U_{\text{bat}}$  为储能移动方舱

中储能电池电压,  $L_{bi}$  为并联支路电感,  $I_{b1}$  和  $I_{b2}$  分别为上下并联支路电感电流,  $C_{bi}$  为高压侧滤波电容。

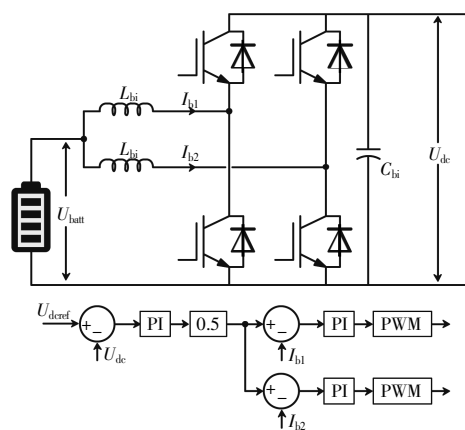


图3 双向DC/DC拓扑和控制算法

借鉴福建某公司 500 kW 应急电源车的技术方案, 稳定运行时内部储能电池存在约  $\pm 14\%$  的电压波动。为稳定直流母线电压、实现内部储能电池与直流接口的隔离, 在储能电池和直流母线间加入双向 DC/DC。为提高储能电池模块的故障冗余能力与供电可靠性, 本文推荐图 3 所示交错并联型双向 DC/DC。将图 3 所示结构视为 2 个图 4 所示双向 DC/DC 并联, 电压外环输出乘以 0.5 后得到各自支路的给定电流, 通过  $I_{b1}$  和  $I_{b2}$  电流环得到各自支路的开关信号。

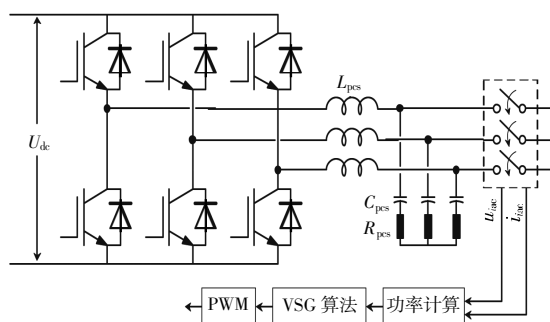


图4 PCS模块拓扑和控制算法

其中,  $L_{bi}$  和  $C_{bi}$  的设计可借鉴附录 A 的式 (A5)。由于并联支路中  $L_{bi}$  流经的电流相等, 各自传输一半额定功率, 因此  $L_{bi}$  仅需式 (A5) 中电感值的一半。

#### 1.4 PCS 模块

储能移动方舱中 PCS 模块的拓扑和控制算

法见图 4。其中,  $L_{pcs}$ ,  $C_{pcs}$ ,  $R_{pcs}$  分别为 LCL 滤波器电感、电容、电阻,  $u_{iac}$  和  $i_{iac}$  分别为输出电压和电流(下标“i”表示第 i 个 PCS,  $i=1, 2$ , 下同)。

图 4 中 VSG 算法的具体模型为:

$$\begin{cases} P_{vsgrefi} + D_{pvsg}(\omega_{acref} - \omega_{ac}) - P_{vsg} = J_{vsg} \omega_{acn} \frac{d\omega_{ac}}{dt} \\ Q_{vsgrefi} + D_{qvsg}(U_{acref} - U_{ac}) - Q_{vsg} = K_{vsg} \omega_{acn} \frac{dE_{vsg}}{dt} \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $P_{vsgrefi}$  和  $Q_{vsgrefi}$  分别为有功和无功功率参考值;  $D_{pvsg}$  和  $D_{qvsg}$  分别为有功下垂系数和无功下垂系数;  $\omega_{acref}$ ,  $\omega_{acn}$  和  $\omega_{ac}$  分别为输出电压的电角速度参考值、额定值和测量值;  $U_{acref}$  和  $U_{ac}$  分别为输出电压的幅值参考值和测量值;  $P_{vsg}$  和  $Q_{vsg}$  分别为输出有功和无功功率测量值;  $J_{vsg}$  和  $K_{vsg}$  分别为有功惯性系数和无功惯性系数;  $E_{vsg}$  为 VSG 的内电势幅值。

GB/T 15945—2008《电能质量 电力系统频率偏差》中规定: 系统容量较小时频率偏差限值为  $\pm 0.5$  Hz, GB/T 12325—2008《电能质量 供电电压偏差》中规定: 20 kV 及以下电压等级三相供电电压偏差为标称电压的  $\pm 7\%$ , 因此:

$$\begin{cases} D_{pvsg} = \frac{S_{vsgn}}{\Delta\omega_{ac}} = \frac{S_{vsgn}}{2\pi \times 0.5} \\ D_{qvsg} = \frac{S_{vsgn}}{\Delta U_{ac}} = \frac{S_{vsgn}}{220\sqrt{2} \times 7\%} \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $S_{vsgn}$  为 PCS 的额定容量;  $\Delta\omega_{ac}$  为输出电压的电角速度偏差范围;  $\Delta U_{ac}$  为输出电压的幅值偏差范围。

借鉴文献[17]设计  $J_{vsg}$  和  $K_{vsg}$ 。根据有功环相角裕度不小于  $45^\circ$ , 则:

$$\begin{cases} J_{vsg} = \frac{D_{pvsg}}{2\pi f_{cnp} \omega_{acref}} \sqrt{\left(\frac{3U_{acref}^2}{4\pi f_{cnp} D_{pvsg} X_{vsg}}\right)^2 - 1} \\ J_{vsgmax} = \frac{D_{pvsg}}{2\pi f_{cnp} \omega_{acref}} \cot \frac{\pi}{4} \end{cases}, \quad (4)$$

式中:  $f_{cnp}$  为有功环截止频率;  $X_{vsg} = \omega_{acref} L_{pcs}$ ;  $J_{vsgmax}$  为  $J_{vsg}$  的最大值。

根据 PCS 交流侧电压相量关系, PCS 出口侧相电压幅值  $U_{om}$  为:

$$U_{om} = \sqrt{U_{acref}^2 + \left(\frac{P_{vsgn} X_{vsg}}{1.5 U_{acref}}\right)^2}. \quad (5)$$

根据两电平逆变器的直流电压增益, 常用调制比 0.85, 因此:

$$U_{\text{dcn}} = \frac{2U_{\text{om}}}{0.85} = \frac{2}{0.85} \sqrt{U_{\text{acref}}^2 + \left( \frac{P_{\text{vsgnr}} X_{\text{vsg}}}{1.5U_{\text{acref}}} \right)^2} \quad (6)$$

由式(6)求解  $L_{\text{pcs}}$  可得:

$$L_{\text{pcs1}} = \frac{1.5U_{\text{acref}}}{100\pi P_{\text{vsgn}}} \sqrt{\left( \frac{0.85U_{\text{dcn}}}{2} \right)^2 - U_{\text{acref}}^2} \quad (7)$$

结合式(4)和式(7),  $J_{\text{vsg}}$  的数值解见图5。

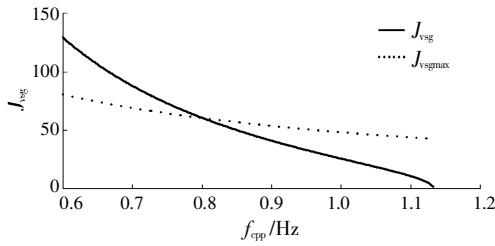


图5  $J_{\text{vsg}}$  的数值解

可见,  $f_{\text{cqp}} \in (0.801 \text{ Hz}, 1.132 \text{ Hz})$ 。本文取  $f_{\text{cqp}}=0.96 \text{ Hz}$ , 代入式(4)可得  $J_{\text{vsg}}=31.57$ 。

同理  $K_{\text{vsg}}$  表达式为:

$$K_{\text{vsg}} = \frac{D_{\text{qvsg}}}{2\pi f_{\text{cqi}}} \sqrt{\left( \frac{3U_{\text{acref}}}{2X_{\text{vsg}} D_{\text{qvsg}}} \right)^2 - 1} \quad (8)$$

式中:  $f_{\text{cqi}}$  为无功环截止频率。

由于式(8)中根号内计算结果小于0, 所以无功环增益全频段内均低于0 dB。为抑制倍频波动, 取无功环截止频率为10 Hz, 则:

$$K_{\text{vsg}} \geq \frac{D_{\text{qvsg}}}{20\pi} \quad (9)$$

最后, 根据文献[15]中PWM整流器的滤波电路设计结论, 若仅采用式(7)所示单电感滤波, 则  $L_{\text{pcs}}$  上电流波动峰值接近40%, 交流母线处重要负荷的供电质量难以保障。借鉴文献[18]设计LCL滤波器参数, 将  $C_{\text{pcs}}$  上消耗的无功限制为  $P_{\text{vsgn}}$  的1%, 即:

$$C_{\text{pcs}} \geq \frac{1\% P_{\text{vsgn}}}{1.5\omega_{\text{acref}} U_{\text{acref}}} \quad (10)$$

## 1.5 参数汇总

综上, 储能移动方舱系统的主要参数汇总于表1。另外, 各模块的开关频率均为5 kHz。

柴油发电机模块可适用上述VSG模型, 也可直接使用同步发电机模型, 其设计依据及所需

表1 图1系统的主要参数

参数	值	参数	值	参数	值
$P_{\text{pv}}/\text{kW}$	150	$L_{\text{pv}}/\text{mH}$	1.1	$C_{\text{pv1}}/\mu\text{F}$	16.4
$C_{\text{pv2}}/\mu\text{F}$	13.4	$P_{\text{dcl}}/\text{kW}$	300	$L_{\text{dcl}}/\text{mH}$	0.54
$C_{\text{dcl}}/\mu\text{F}$	93	$P_{\text{essn}}/\text{kW}$	150	$L_{\text{ess}}/\text{mH}$	0.59
$C_{\text{ess}}/\text{mF}$	0.68	$U_{\text{battn}}/\text{V}$	450	$L_{\text{li}}/\text{mH}$	2.4
$C_{\text{li}}/\text{mF}$	0.83	$U_{\text{dcn}}/\text{V}$	800	$D_{\text{prog}}$	95 493
$D_{\text{qvsq}}$	13 775	$L_{\text{pcs}}/\text{mH}$	0.68	$C_{\text{pcs}}/\mu\text{F}$	66
$R_{\text{ps}}/\Omega$	0.6	$P_{\text{vsgn}}/\text{kW}$	300	$J_{\text{vsg}}$	31.57
$K_{\text{vsg}}$	220	$\omega_{\text{acn}}$	$100\pi$	$V_{\text{acref}}/\text{V}$	380
$P_{\text{ach}}/\text{kW}$	300	$P_{\text{genn}}/\text{kW}$	100	$D_{\text{pgen}}$	4 547.3

锁相环、准同步措施等详见附录A。

## 2 协调控制方法

根据图1所示基本拓扑和表1所示主要参数, 设计整体系统的协调控制方法, 以实现如下控制目标:

目标1, 稳态运行及光伏退出、负荷突变等暂态过程中直流母线电压满足GB/T 35727—2017《中低压直流配电电压导则》, 交流母线电压满足GB/T 15945—2008《电能质量 电力系统频率偏差》和GB/T 12325—2008《电能质量 供电电压偏差》, 且尽可能提高交流供电质量;

目标2, 促进或实现储能移动方舱间的SOC均衡;

目标3, 尽可能采用现场新能源及方舱内部储能电池供电, 柴油发电机仅作为热备用, 待方舱内部电池组能量不足时再由柴油发电机自动补足差额功率。

### 2.1 直流母线协调控制方法

根据图1所示拓扑, 直流母线与光伏、直流负荷、外部储能和储能移动方舱中的双向DC/DC相连。为实现控制目标1和2, 直流母线协调控制方法如图6所示。

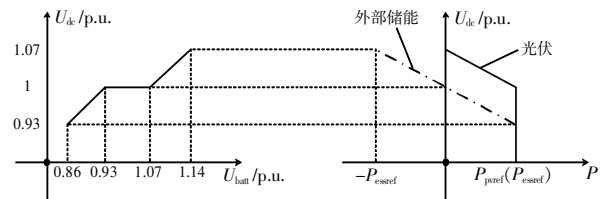


图6 直流母线协调控制方法

结合图6, 当  $U_{\text{batt}} \in (0.93 \text{ p.u.}, 1.07 \text{ p.u.})$  时, 认为储能电池工作正常, 控制双向DC/DC使

$U_{dc}=1$  p.u., 取消下垂控制的稳态静差。此时, 光伏处于 MPPT 模式, 外部储能的输出功率为 0, 优先采用光伏供电。

当  $U_{batt} \leq 0.93$  p.u. 时, 认为储能电池电压过低, 控制双向 DC/DC 使  $U_{dc}$  开始线性下降, 外部储能发出功率线性上升, 光伏依旧处于 MPPT 模式, 因此通过增大输入功率、减小阻性负荷功率来抑制储能电池电压进一步下降。当  $U_{batt}=0.86$  p.u. 时, 认为储能电池临近停机, 此时控制外部储能和光伏处于最大功率输出, 储能方舱用外部电源最大限度维持供电。

$U_{batt} \geq 1.07$  p.u. 时, 认为储能电池电压过高, 控制双向 DC/DC 使  $U_{dc}$  线性上升, 外部储能吸收的功率线性上升, 光伏退出 MPPT 模式且输出功率线性下降, 因此通过减小输入功率、增大输出功率来抑制储能电池电压进一步上升。当  $U_{batt}=1.14$  p.u. 时, 认为储能电池电量饱和, 此时控制光伏停机、外部储能吸收额定功率, 储能方舱用外部电源最大限度吸收电能以防止储能电池过度充电。

图 6 中左侧分段下垂控制曲线的具体实施算法如图 7 所示。

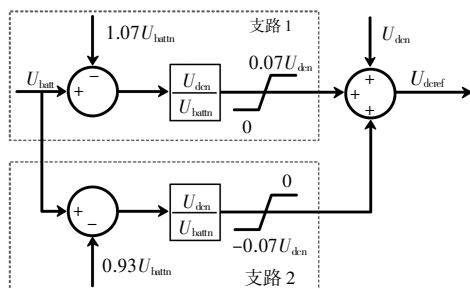


图 7 双向 DC/DC 电压给定

当  $U_{batt} \in (1.07 \text{ p.u.}, 1.14 \text{ p.u.}]$  时, 支路 1 将  $U_{batt}$  相对于  $1.07u_{batt}$  的增量成比例地转化为  $U_{dc}$  的增量, 支路 2 输出为 0,  $U_{deref}$  与  $U_{batt}$  成正比。当  $U_{batt} \in [0.86 \text{ p.u.}, 0.93 \text{ p.u.})$  时, 支路 1 输出为 0, 支路 2 将  $U_{batt}$  相对于  $0.93U_{batt}$  的增量成比例地转化为  $U_{dc}$  的增量,  $U_{deref}$  与  $U_{batt}$  成正比。当  $U_{batt} \in [0.93 \text{ p.u.}, 1.07 \text{ p.u.}]$  时, 支路 1 和支路 2 输出均为 0,  $U_{deref}$  为额定值。将上述  $U_{deref}$  输送至图 3 中的  $U_{deref}$ , 用双向 DC/DC 控制  $U_{dci}$  以实现图 6 所示分段下垂控制曲线。

结合图 2 和图 6, 光伏的有功功率参考值为:

$$P_{pvref} = P_{pvn} - \frac{\max(U_{dcn}, U_{dc}) - U_{dcn}}{0.07U_{dcn}} P_{pvn} \quad (11)$$

结合图 4 和图 6, 外部储能电流参考值为:

$$I_{essref} = -\frac{P_{essn}}{0.07U_{essn}U_{dcn}} U_{dc} + \frac{P_{essn}}{0.07U_{essn}} \quad (12)$$

## 2.2 交流母线二次调节方法

根据图 1, 交流母线与两台 PCS 和柴油发电机相连。为实现控制目标 1, 2 和 3, 本部分推导交流母线二次调节方法。

化简文献[19]中带调速器的转矩方程, 设计 SOC 均衡函数, 并与式(2)中的有功环连列, 可得:

$$\begin{cases} P_{vsgn} + f_1(S_{OC1}, S_{OC2}) + D_{pvsg}(\omega_{acref} - \omega_{ac}) - P_{vsg1} = J_{vsg} \omega_{acn} \frac{d\omega_{ac}}{dt} \\ P_{vsgn} + f_2(S_{OC1}, S_{OC2}) + D_{pvsg}(\omega_{acref} - \omega_{ac}) - P_{vsg2} = J_{vsg} \omega_{acn} \frac{d\omega_{ac}}{dt} \\ P_{genref} + D_{pgen}(\omega_{acref} - \omega_{ac}) - P_{gen} = J_{gen} \omega_{acn} \frac{d\omega_{ac}}{dt} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $P_{genref}$  和  $P_{gen}$  为柴油发电机的有功功率参考值和测量值;  $J_{gen}$  为柴油发电机的转动惯量;  $f_i(S_{OC1}, S_{OC2})$  为第  $i$  个储能移动方舱的 SOC 均衡函数, 其中  $S_{OC1}, S_{OC2}$  为电池荷电状态值。

式(13)可化简为:

$$\omega_{ac} = \omega_{acref} - \frac{P_{acl} - 2P_{vsgn} - P_{genref} - f_1(S_{OC1}, S_{OC2}) - f_2(S_{OC1}, S_{OC2})}{2D_{pvsg} + D_{pgen}} \quad (14)$$

式中:  $P_{acl}$  为交流负荷功率测量值。

根据式(13)和(14), 求解输出功率可得:

$$\begin{cases} P_{vsg} = \frac{D_{pgen} P_{vsgn} + D_{pvsg}(P_{acl} - P_{genref})}{2D_{pvsg} + D_{pgen}} + f_i(S_{OC1}, S_{OC2}) + \\ \quad D_{pvsg}(\omega_{acref} - \omega_{ac}) - \frac{D_{pvsg} \sum f_i(S_{OC1}, S_{OC2})}{2D_{pvsg} + D_{pgen}} \\ P_{gen} = \frac{2D_{pvsg} P_{genref} + D_{pgen}(P_{acl} - 2P_{vsgn})}{2D_{pvsg} + D_{pgen}} + D_{pgen}(\omega_{acref} - \omega_{ac}) - \\ \quad \frac{D_{pgen} \sum f_i(S_{OC1}, S_{OC2})}{2D_{pvsg} + D_{pgen}} \end{cases} \quad (15)$$

动力电池 SOC 可用范围一般为 [15%, 95%], 设计 SOC 均衡算法为:

$$\begin{cases} f_1(S_{OC1}, S_{OC2}) = \frac{P_{vsgn}}{0.8} (S_{OC1} - S_{OC2}) \\ f_2(S_{OC1}, S_{OC2}) = \frac{P_{vsgn}}{0.8} (S_{OC2} - S_{OC1}) \end{cases} \quad (16)$$

根据控制目标 1 和 3, 稳态运行时  $\omega_{ac} = \omega_{acn}$ ,

$P_{\text{gen}}=0$ 。结合式(16), 式(15)第二式可化简为:

$$P_{\text{genref}} = \frac{D_{\text{pgen}}(2P_{\text{vsgn}} - P_{\text{acl}})}{2D_{\text{pvsg}}} \quad (17)$$

根据式(15)、式(16)、式(17)可得交流母线二次调节方法为:

$$\begin{cases} P_{\text{vsgref1}} = P_{\text{vsgn}} + \frac{P_{\text{vsgn}}}{0.8}(S_{\text{OC1}} - S_{\text{OC2}}) \\ P_{\text{vsgref2}} = P_{\text{vsgn}} + \frac{P_{\text{vsgn}}}{0.8}(S_{\text{OC2}} - S_{\text{OC1}}) \\ \omega_{\text{acref}} = \omega_{\text{acn}} + \frac{P_{\text{vsg1}} + P_{\text{vsg2}} - 2P_{\text{vsgn}} - P_{\text{genref}}}{2D_{\text{pvsg}} + D_{\text{pgen}}} \\ P_{\text{genref}} = \frac{D_{\text{pgen}}(2P_{\text{vsgn}} - P_{\text{vsg1}} - P_{\text{vsg2}})}{2D_{\text{pvsg}}} \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中  $P_{\text{vsg1}}$ ,  $P_{\text{vsg2}}$ ,  $S_{\text{OC1}}$ ,  $S_{\text{OC2}}$  可由方舱自身传感器测量得到, 其余参数为固定值。因储能移动方舱之间可实现通信(2 ms 延时), 因此式(18)所需信息均可快速获得, 且不涉及附加传感器及通信建设, 还避免了算法切换、环路更改、控制参数在线调整等问题。

将式(18)前三式代入式(2)、后两式代入柴油发电机的调速器, 即可实现控制目标 1, 2 和 3。对于控制目标 1, PCS 和柴油发电机自带下垂特征, 负荷突变时可自动参与交流母线电压调节, 维持系统稳定。根据式(15)和式(18)的第三式, 即使在负荷突变的暂态过程中交流母线频率依旧稳定于  $\omega_{\text{acn}}$ 。对于控制目标 2, 根据式(2)和式(18)的前两式, 若某方舱储能电池的 SOC 过高, 则该方舱的输出功率线性增大, 另一方舱的输出功率线性减小, 通过更改方舱间的功率分配来促进 SOC 均衡。考虑到实际储能移动方舱的储能电池容量较大、惯性较大, 所提 SOC 均衡函数可能难以实现储能移动方舱间的 SOC 实时相等。对于控制目标 3, 根据式(16)、式(17)和式(15)的第二式, 稳定运行时  $P_{\text{gen}}=0$ , 稳态时交流负荷所需功率均由储能移动方舱承担, 柴油发电机仅作为热备用。

### 3 方案验证

采用图 1 所示拓扑、图 7 和式(18)所示协调控制方法, 对所提系统在稳态、交流负荷突变和光伏切除工况下的运行性能进行仿真验证。

设置储能移动方舱 1 中储能电池 SOC 初始值为 70%、储能移动方舱 2 中储能电池 SOC 初

始值为 80%, 以验证式(16)所示 SOC 均衡函数效果。结合图 1 所示结构可知, 储能移动方舱 1 与储能移动方舱 2 相比, 不但初始 SOC 较低, 而且直流母线额外接有 300 kW 负荷。因此, 储能移动方舱 1 运行工况更加恶劣。

1.35 s 并联开关合闸, 柴油发电机并入交流母线。3 s 时发生负荷突变 100% 以验证所提交流母线二次调节方法的有效性, 或切除光伏 2 以验证图 7 所示直流母线协调控制方法的有效性。

#### 3.1 稳态运行仿真结果

稳态运行仿真结果如图 8 所示。

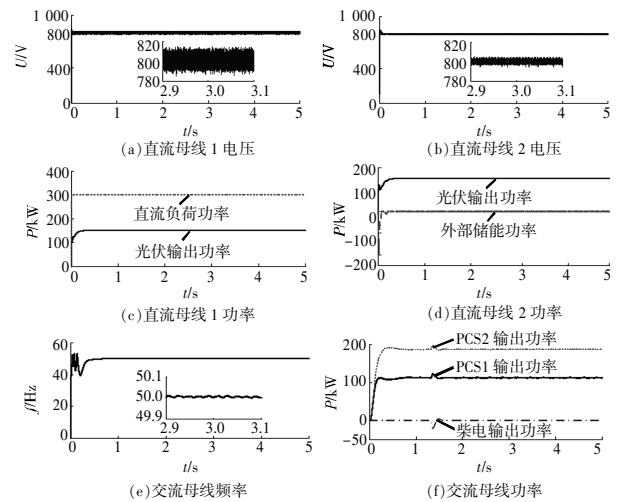


图 8 稳态运行仿真结果

图 8 中, 1.35 s 并联开关合闸, 柴油发电机并入交流母线, 因准同期并列条件较为宽泛而使系统出现暂态调节过程。根据图 8(a)和(b), 储能移动方舱 1 和储能移动方舱 2 的直流母线输出电压均稳定在 800 V, 满足 GB/T 35727—2017 要求。因储能移动方舱 1 的运行工况更加恶劣,  $U_{\text{dc1}}$  存在  $\pm 15$  V 的波动,  $U_{\text{dc2}}$  更加平稳。根据图 8(c)和(d), 光伏 1、直流负荷、光伏 2 额定运行, 外部储能不工作, 与图 6 中  $U_{\text{dc}}=1$  p.u. 的设定工况相符。结合图 8(e)和(f), 交流母线频率为额定值, 电能均由储能方舱提供, 柴油发电机仅作为热备用而不参与供电。其中, PCS1 输出功率 112.4 kW, PCS2 输出功率 187.4 kW, 与式(15)所得结果 115 kW 和 190 kW 吻合。因此, 仿真结果与预期目标相符。

#### 3.2 交流负载功率突变仿真结果

交流负载功率突变仿真结果如图 9 所示。3 s 时交流负荷突变 100%。由图 9(a)—(d)可知, 交流

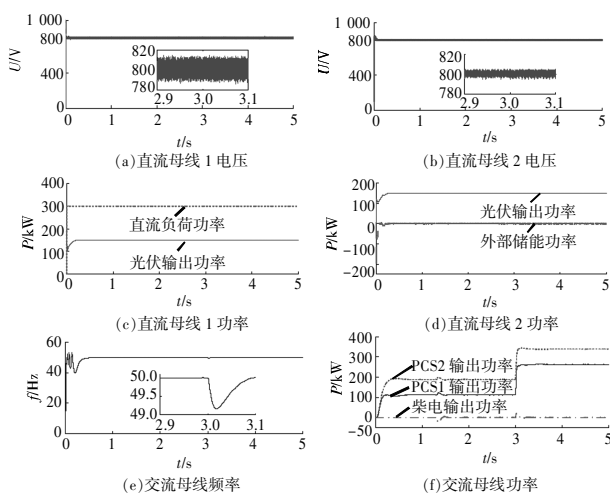


图9 交流负载功率突变仿真结果

负荷突增后,直流母线1和直流母线2电压无波动,光伏、直流负荷、外部储能输出功率稳定,对比图8(a)—(d)可知交流负荷突变不影响直流母线运行情况。图9(e)显示交流母线频率出现瞬间下跌,但在0.05 s内恢复至额定值,调节速度和精度不受PCS大惯性影响。根据图9(f),稳态时负荷功率均由储能移动方舱承担,柴油发电机仅作为热备用,功率分配满足式(15)。结合图9(e)和图8(f)可知,即使PCS处于暂态调节过程中,交流母线同样可以实现额定频率供电,这充分展示了交流母线二次调节方法的有效性。

### 3.3 光伏切除仿真结果

光伏切除仿真结果如图10所示。

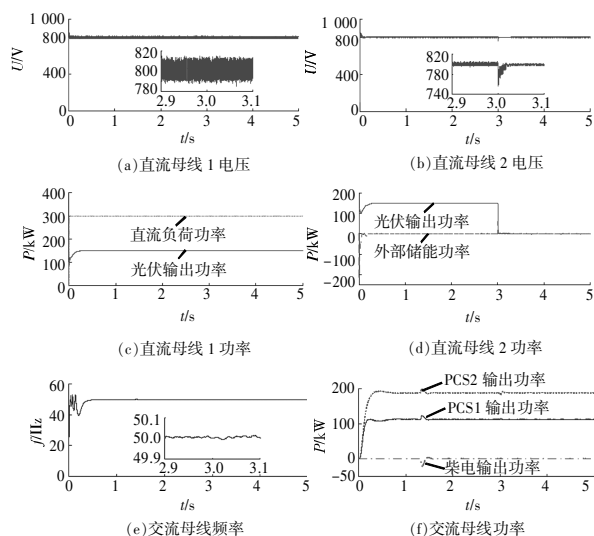


图10 光伏切除仿真结果

3 s时切除光伏2。根据图10(a)和(c)可知,切除直流母线2处光伏时,直流母线1处电压稳定,光伏1和直流负荷输出波形无波动。根据图10(e)和(f)可知,仅PCS2功率出现极小幅波动,交流母线频率和功率波形与图8(e)和(f)吻合,因此直流母线处模块切除不影响交流母线动态,重要负荷的电能质量可得到保障。由图10(b)可知,光伏切除瞬间直流母线电压尖峰不超过7%,且能在0.1 s内恢复至额定值。图10(d)显示,外部储能输出功率随 $U_{d2}$ 的下降而上升,与图6所示调节规律相符。

## 4 结论

本文提出了一种多能源接入储能移动方舱的拓扑与电压控制方案,得到如下结论:

(1)直流母线分立、交流母线并联的方式适用于应急现场多能源汇集,且可屏蔽新能源在线投退对重要负荷供电质量的影响。

(2)设计了交直流母线电压校正、SOC均衡措施,自动实现储能移动方舱优先供电,柴油发电机仅作为热备用。在外部能源切除工况下的直流电压变化不超过7%,重要负荷突变工况下频率可在0.1 s内恢复至额定值。

### 参考文献:

- [1] 米阳,宋根新,蔡杭谊,等.基于分段下垂的交直流混合微电网自主协调控制[J].电网技术,2018,42(12):3941-3950.
- [2] GU Y, LI W, HE X. Passivity-based control of DC micro grid for self-disciplined stabilization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5):2623-2632.
- [3] 米阳,陈鑫,季亮,等.基于虚拟额定电流的直流微电网分布式储能单元精确电流分配研究[J].电网技术,2020, 44(3):823-834.
- [4] HAN Y, NING X, YANG P, et al. Review of power sharing, voltage restoration and stabilization techniques in hierarchical controlled DC microgrids[J]. IEEE Access, 2019, 7:149202-149223.
- [5] ZHANG Q, LI Y, DING Z, et al. Self-adaptive secondary frequency regulation strategy of micro-grid with multiple virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5):6007-6018.
- [6] 阳建,刘勇,盘宏斌,等.基于虚拟同步机的微网逆变器无频差控制[J].电网技术,2016,40(7):2001-2008.

- [7] XU Q, HU X, WANG P, et al. A decentralized dynamic power sharing strategy for hybrid energy storage system in autonomous DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64(7):5930-5941.
- [8] 刘子文, 苗世洪, 范志华, 等. 基于自适应下垂特性的孤立直流微电网功率精确分配与电压无偏差控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4):163-174.
- [9] 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.
- [10] SHI R, ZHANG X, HU C, et al. Self-tuning virtual synchronous generator control for improving frequency stability in autonomous photovoltaic-diesel microgrids[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(3):482-494.
- [11] 石荣亮, 张兴, 刘芳, 等. 提高光储柴独立微网频率稳定性的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22):77-85.
- [12] 胡超, 张兴, 石荣亮, 等. 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[J]. 太阳能学报, 2019, 40(3):809-816.
- [13] 胡超, 张兴, 石荣亮, 等. 独立微电网中基于自适应权重系数的VSG协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2):516-524.
- [14] PAN P, CHEN W, MU H. Decentralized unified control strategy for medium and low voltage DC distribution power system[C]//8th Renewable Power Generation Conference (RPG 2019). Shanghai, China: Shanghai Jiaotong University, 2019:1-6.
- [15] 林渭勋. 现代电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [16] 王晓明. 电动汽车交错并联双向DC/DC变换器的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
- [17] 吴恒, 阮新波, 杨东升, 等. 虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24):6508-6518.
- [18] 黄宇洪, 姜新建, 邱阿瑞. LCL滤波器在三相PWM整流器中的应用[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(12):110-113.
- [19] SHI K, SONG W, GE H, et al. Transient analysis of microgrids with parallel synchronous generators and virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(1):95-105.
- [20] LUNA A, ROCABERT J, CANDELA J I, et al. Grid voltage synchronization for distributed generation systems under grid fault conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 51(4):3414-3425.

收稿日期: 2021-02-02

作者简介: 叶海涵(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源发电与并网。

陈武(1981), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为分布式发电与新能源并网、特种工业电源等。(通讯作者)

(本文编辑: 童凯)

## 附录 A

### 1 滤波参数设计

设计  $L_{pv}$  使输出功率波动不超过 10%，具体过程如图 A1 所示。其中， $U_{L_{pv}}$  为电感  $L_{pv}$  的电压， $D_{pv}$  为光伏模块占空比， $T_{pv}$  为光伏模块开关时间。

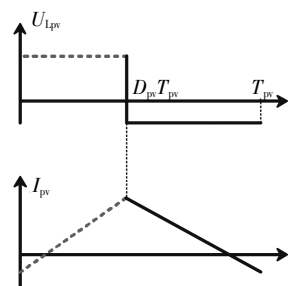


图 A1 电感参数设计

假设  $C_{pv1}$  仅吸收  $I_{pv}$  的高频波动，对  $I_{pv}$  的低频分量无影响。因此，忽略  $C_{pv1}$  和  $I_{pv}$  的高频波动，用  $I_{pv}$  的平均值代替瞬时值，一个开关周期内  $U_{L_{pv}}$  和  $I_{pv}$  的波形如图 A1 所示。

稳定运行时  $U_{pv} = U_{pvn}$ ， $U_{dc} = U_{dcn}$ 。要求输出功率波动不超过 10%，即  $\Delta I_{pv}$  不超过 10%。以图 A1 中虚线阶段为例，可得：

$$U_{pvref} \leq L_{pv} \frac{\Delta I_{pv}}{D_{pv} T_{pv}} \quad (A1)$$

根据 boost 占空比关系可得：

$$U_{dcn} = \frac{U_{pvref}}{1 - D_{pv}} \Rightarrow D_{pv} = \frac{U_{dcn} - U_{pvref}}{U_{dcn}} \quad (A2)$$

将式(A2)代入式(A1)可得：

$$U_{pvref} \leq L_{pv} \frac{U_{dcn} \Delta I_{pv} f_{pv}}{U_{dcn} - U_{pvref}} \Rightarrow L_{pv} \geq \frac{(U_{dcn} - U_{pvref}) U_{pvref}^2}{\Delta P_{pvn} U_{dcn} f_{pv}} \quad (A3)$$

## 2 直流负荷模块

图1中直流负荷的具体拓扑和控制算法如图A2所示。其中,  $R_{\text{dcl}}$  为直流负荷的负载电阻,  $U_{\text{dclref}}$  和  $U_{\text{dcl}}$  为直流负荷的电压参考值和测量值,  $C_{\text{dcl}}$  为滤波电容,  $L_{\text{dcl}}$  为滤波电感。

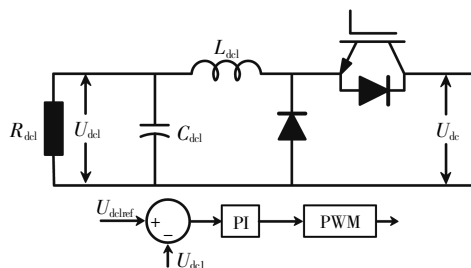


图 A2 直流负荷模块

直流负荷模块采用定电压控制的 buck 变换器和负荷电阻实现, 通过维持  $R_{\text{dcl}}$  端电压不变以模拟恒功率直流负荷。

与式(A1)方法类似, 设计  $L_{\text{dcl}}$  使负载功率波动不超过 10%, 可得:

$$\begin{cases} L_{\text{dcl}} \geq \frac{(U_{\text{dcn}} - U_{\text{dclref}}) U_{\text{dclref}}^2}{\Delta P_{\text{dcln}} U_{\text{dcn}} f_{\text{dcl}}} \\ C_{\text{dcl}} = \left(1 - \frac{U_{\text{dclref}}}{U_{\text{dcn}}}\right) \frac{U_{\text{dclref}}}{8L_{\text{dcl}} \Delta U_{\text{dclref}} f_{\text{dcl}}^2} \end{cases}, \quad (\text{A4})$$

式中:  $f_{\text{dcl}}$  为光伏变换器开关频率;  $\Delta P_{\text{dcln}} = 10\% P_{\text{dcln}}$  为直流负荷有功偏差范围;  $\Delta U_{\text{dclref}} = 5\% U_{\text{dclref}}$  为直流负荷电阻端电压偏差范围。

## 3 外部储能模块

图1中外部储能的具体拓扑和控制算法如图A3所示。其中,  $U_{\text{ess}}$  为外部储能电压,  $I_{\text{essref}}$  和  $I_{\text{ess}}$  为外部储能的电流参考值和测量值,  $C_{\text{ess}}$  为输出滤波电容,  $L_{\text{ess}}$  为滤波电感。

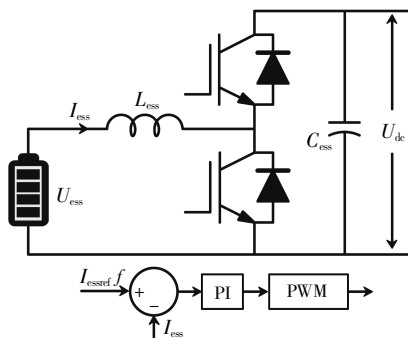


图 A3 外部储能模块

外部储能的双向变换器采用定电流控制的非隔离型双向 buck/boost 变换器, 输出 PWM 信号送至下开关管, 取反后送至上开关管。当  $I_{\text{ess}}$  减小时, 占空比增大, 由伏秒平衡可知  $L_{\text{ess}}$  的压降减小,  $I_{\text{ess}}$  上升直至稳定于  $I_{\text{essref}}$ 。

$L_{\text{ess}}$  的设计借鉴文献[15]。与式(A1)方法类似, 设计  $C_{\text{ess}}$  使  $U_{\text{dc}}$  波动不超过 5%, 可得:

$$\begin{cases} L_{\text{ess}} \geq \frac{U_{\text{dcn}} U_{\text{essn}}}{4f_{\text{ess}} \Delta P_{\text{essn}}} \\ C_{\text{ess}} = \left(1 - \frac{U_{\text{essn}}}{U_{\text{dcn}}}\right) \frac{P_{\text{essn}}}{U_{\text{dcn}} \Delta U_{\text{dcn}} f_{\text{ess}}} \end{cases}, \quad (\text{A5})$$

式中:  $U_{\text{essn}}$  为外部储能电压参考值;  $f_{\text{ess}}$  为外部储能的开关频率;  $\Delta P_{\text{essn}} = 10\% P_{\text{essn}}$  为外部储能的有功偏差范围。

## 4 柴油发电机模块

根据 GB/T 2820.5—2009/ISO 8528—5:2005《往复式内燃机驱动的交流发电机组 第5部分: 发电机组》, 柴油发电机主要由发电机、励磁器和调速器构成, 具备频率-有功下垂特性。因此, 借鉴文献[19]中调速器和励磁器结构, 并采用 100 kW 凸极同步发电机模拟图1中的柴油发电机。

GB/T 2820.5—2009/ISO 8528—5:2005《往复式内燃机驱动的交流发电机组 第5部分: 发电机组》表明, G3 等级发电机组在稳定运行条件下突加 100% 有功时, 频率降应不大于 7%。因此, 调差系数  $k_{\delta}$  或有功下垂系数  $D_{\text{pgen}}$  应设置为:

$$k_{\delta} = \frac{1}{7\%} \Leftrightarrow D_{\text{pgen}} = \frac{P_{\text{pgen}}}{7\% \omega_{\text{acn}}} \quad (\text{A6})$$

## 5 其他

因 PCS、柴油发电机均为电压源, 不同的电压源无法直接并联, 因此还需在 PCS 和柴油发电机中加入准同期算法。根据 GB/T 15945—2008《电能质量 电力系统频率偏差》和 GB/T 12325—2008《电能质量 供电电压偏差》, 稳态运行时交流电压频率差应不大于 0.5 Hz、幅值差应不大于 7%, 因此将幅值差 7%、频率差 0.5 Hz、相位差 5° 作为并联开关合闸条件。

因准同期算法中需要频率和相位信息, 为此还需设计锁相环。本文采用同步锁相环, 具体设计方法借鉴文献[20]。