

# Application Design of Lithium Battery Energy Storage System in Important User Distribution Network

Peng Zhang, Chao Liu, Yanlin Wu, Hui Wang, Yuanyuan Yue

State Grid Shaanxi Electric Power Economic Technology Research Institute, Xi'an Shaanxi  
Email: 15909128315@163.com

Received: Dec. 2<sup>nd</sup>, 2018; accepted: Dec. 20<sup>th</sup>, 2018; published: Dec. 27<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

In recent years, the application fields of new energy storage technologies have been expanding and become an indispensable part of the power system. This paper briefly describes the development of lithium battery energy storage technology and the application of lithium battery battery energy storage system to the distribution network. With a typical user of 400 kW as an example, we design a complete set of 400 kW·h lithium iron phosphate battery energy storage. The system and the electromagnetic transient simulation of the system based on PSCAD; the simulation results show that the energy storage system can well respond to the electromagnetic transient process of this typical important user, and thus better protect the user's power reliability and security.

## Keywords

Lithium Battery Energy Storage, Distribution Network, PSCAD Simulation

---

# 锂电池储能系统在重要用户配电网的应用设计

张 鹏, 刘 超, 吴延琳, 王 辉, 岳园园

国网陕西省电力公司经济技术研究院, 陕西 西安  
Email: 15909128315@163.com

收稿日期: 2018年12月2日; 录用日期: 2018年12月20日; 发布日期: 2018年12月27日

---

## 摘 要

近年来, 新型储能技术的应用领域不断拓展, 并且已成为组成电力系统不可或缺的一分子。本文简明阐

文章引用: 张鹏, 刘超, 吴延琳, 王辉, 岳园园. 锂电池储能系统在重要用户配电网的应用设计[J]. 智能电网, 2018, 8(6): 617-627. DOI: 10.12677/sg.2018.86069

述了锂电池储能技术的发展以及锂电池储能系统应用于配电网的概况，且以某400 kW的典型用户为例，设计一个整套400 kW·h磷酸铁锂电池储能系统，并基于PSCAD对该系统进行电磁暂态的仿真，仿真结果表明，该储能系统能够很好的应对此典型重要用户的电磁暂态过程，进而更好的保障该用户的用电可靠性与安全性。

## 关键词

锂电池储能，配电网，PSCAD仿真

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 绪论

近年来，随着风能、光伏等新能源技术发电的持续迅猛发展，储能技术作为智能电网的重要组成部分，已在用户侧获得越来越多的应用，例如对重要用户持续可靠的供电，要求储能技术不仅需具备快速大功率调节特性，还需具有较大的储能容量。文献[1]介绍了几类面向电网的储能电源，目前发展前景最优且相对成熟的电池储能技术主要为锂离子电池及燃料电池储能系统。

研究表明，燃料电池储能系统虽在能量密度、设计容量等性能在理论上优于锂离子储能系统，但燃料电池因其标准发布年限偏早且少，针对日益迅速进步的社会来说，这套标准和现状之间的契合性远不及锂电池。在成本方面，燃料电池系统高出锂电池系统 3200 元/kWh [2]，若要完成此次 400 kW/400 kW·h 的储能系统的整体设计及实施，锂电池纯能系统的预算价格为 70 万元，而以氢为原料，并配备制氢设备的燃料电池厂家给出的预算价格为 2300 万元，具体部分预算如表 1 所示。

**Table 1.** 400 kW/400 kW·h lithium battery and fuel cell cost budget

**表 1.** 400 kW/400 kW·h 锂电池与燃料电池造价预算表

| 锂电池储能系统预算  |       | 燃料电池储能系统预算  |         |
|------------|-------|-------------|---------|
| 锂电池本体及逆变单元 | 50 万元 | 太阳能和制氢储能部分  | 700 万元  |
| 一二次接入设备部分  | 15 万元 | 燃料电池及并网部分   | 1500 万元 |
| 相关安装布置费用   | 5 万元  | 土建及相关安装布置费用 | 100 万元  |
| 总计         | 70 万元 | 总计          | 2300 万元 |

本文主要研究了锂电池接入配电网的三个不同方案，进行相关计算和选型，同时考虑其电能质量与经济性等指标进行方案选择。并且研究了锂电池在充电模式下的恒流和恒压控制策略，放电模式下的 V/f 控制双闭环控制策略以及投切控制策略，最后对储能系统接入电网后的电网暂态过程进行了仿真分析，对重要用户的配电系统设计具有一定的参考价值。

## 2. 接入方案的设计与对比

### 2.1. 系统主接线及负荷配置

本次储能供电方案设计对象主要为重要用户，所以本文选择将锂电池储能系统接入某数据中心，其主接线如图 1 所示，10 kV 侧母线采用单母分段接线方式，两段母线之间配有母联断路器，两段母线互

为备；0.4 kV 侧母线也采用单母分段接线方式，两段母线同样互为备用，而 10 kV 母线与 0.4 kV 母线间通过 10/0.4 kV 变压器连接，最终的用户负荷通过 0.4 kV 侧母线接入系统。

对于重要用户来说，其一二级负荷占比较大，相应的三级负荷占比较小，在设置锂电池储能接入系统时，可认为在系统失电后将自动断开与三级负荷的连接，而储能系统只需要保证相对重要的一二级负荷的供电可靠性即可。本文中锂电池储能系统所供给的重要用户功率一共为 500 kW，其各级负荷的具体占比如图 2 所示，因此实际接入锂电池储能系统的容量按照一二级总负荷的有功功率 400 kW 进行电池容量的计算以及储能系统的整体设计。

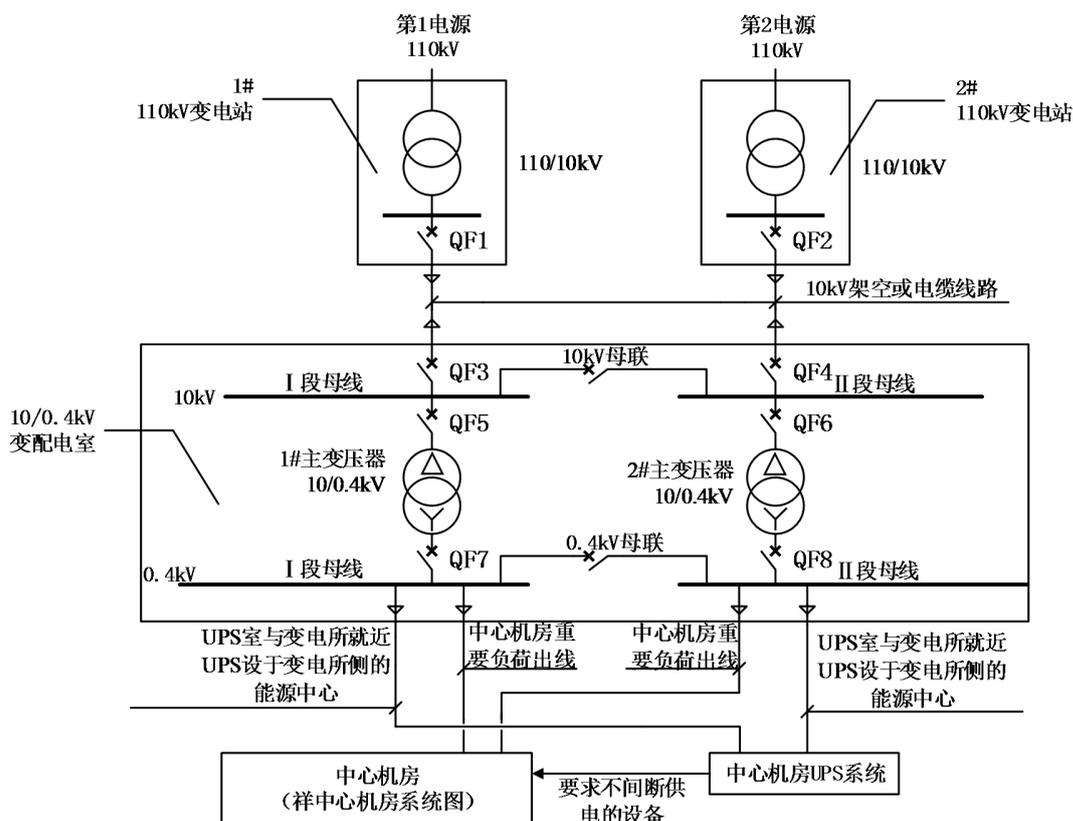


Figure 1. Main wiring of an important user system

图 1. 某重要用户系统主接线

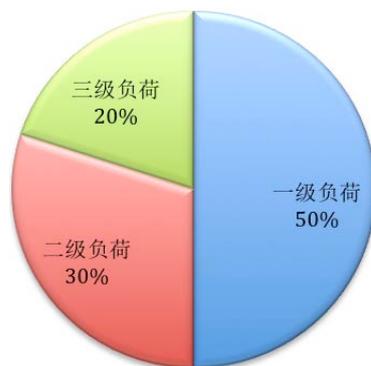


Figure 2. The proportion of load at all levels of important users

图 2. 重要用户的各级负荷占比

## 2.2. 储能电池的选择

图 3(a)为典型的锂电池储能系统结构, 其由一个或多个储能单元基本构成, 电池堆(BP), 储能逆变器(PCS)和电池管理单元(BMS)又构成了一个个储能单元, 如图 3(b)所示, 而一条储能支路是由一个储能单元和一个低压接入开关组成。一般针对大容量兆瓦级的储能系统, 考虑到经济与运维特性, 一般会将单个储能单元的容量设置为总负荷功率的 1/2 或 1/4, 再根据单个储能单元的容量配备相应的电池管理单元和储能逆变器。因为此次 400 kW/400 kWh 的用电要求是属于较小容量储能系统的, 所以可以 400 kW 单独接入分为两路 200 kW 储能单元接入低压母线。

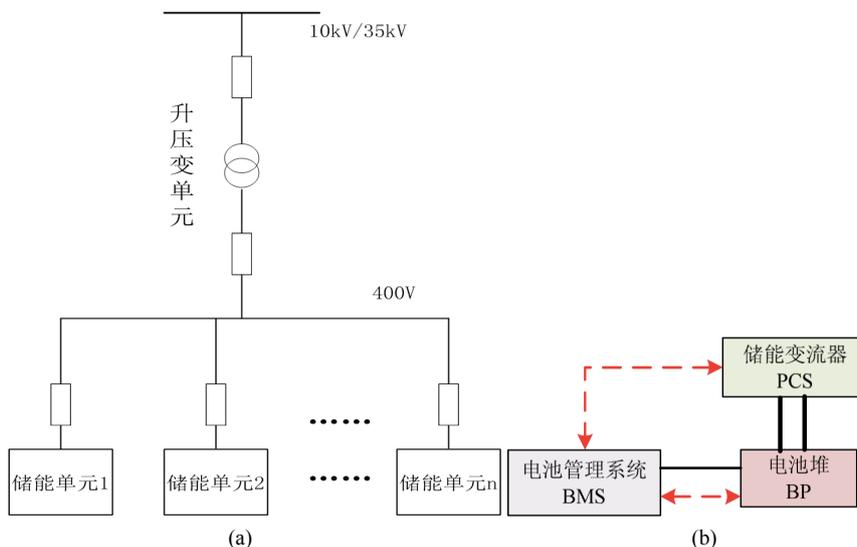


Figure 3. (a) Typical lithium battery energy storage system topology diagram; (b) Schematic diagram of energy storage unit structure

图 3. (a) 典型锂电池储能系统的拓扑结构图; (b) 储能单元结构示意图

## 2.3. 锂电池储能系统接入方案的选择

考虑母线的电压等级及对重要用户负荷的供电要求, 系统主接线的低压 400 V 侧和高压 10 kV 侧都为单母分段接线, 并结合其有功负荷功率的配置, 设计了以下三种锂电池储能系统的接入方式。

方案一是将锂电池储能系统通过一 10 kV/0.6 kV 的变压器接入备用电源侧 10 kV 母线(II 段), 并配备相应断路器和隔离开关, 同时配置相应的 10 kV 母联备自投保护测量监控装置和变压器保护装置, 保证与原系统的二次配合, 其接入方式如图 4 所示。

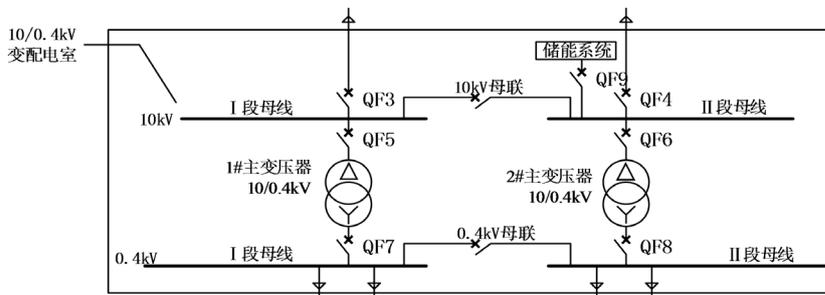


Figure 4. The energy storage system is connected to the 10 kV bus of the standby power supply side

图 4. 储能系统接入备用电源侧 10 kV 母线(II 段)

方案二是将所有锂电池部分作为一个储能系统接入备用电源侧的 400 V 母线(II 段), 配备相应低压开关, 并配备相应的 400 V 低压母联备自投保护设备, 其余接线不变, 其具体接入图如图 5 所示。

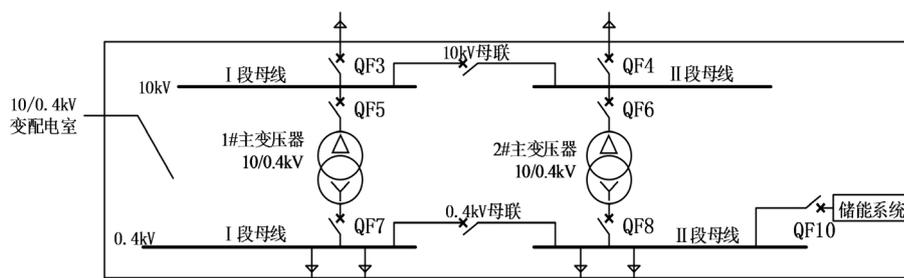


Figure 5. The energy storage system is directly connected to the single 400 V bus  
图 5. 储能系统直接接入单侧 400 V 母线

方案三中将锂电池储能系统按照其容量等分成两部分分别接入两段 400 V 母线, 配备与方案二类型相同的开关与二次设备两套, 具体接入方式如图 6 所示。

方案一对于接入 10 kV 电压等级电网的储能系统, 由于其接入电压等级较高, 容易引起保护配置和绝缘的问题, 对重要用户的供电可靠性造成威胁。而且因其对电网质量的影响较大, 所以规定其电能质量的数据要能够远程传送, 以满足电网企业对电能质量检测的要求, 所以对储能系统接线的要求相对较高; 当储能电池接入 10 kV 高压侧时, 由于储能电池的额定电压相对较低, 所以必须经过升压变压器与 10 kV 高压母线连接, 所以设备投资较大。在方案二中, 由于本次其接入 400 V 电压等级的储能系统容量较小, 且能在储存对应时间的电能, 以备重要用户的使用, 故供电可靠性较高, 同时, 因其额定电压与母线电压为同一等级, 故无需变压器, 减少了设备投资成本, 且有利于工作人员后期对储能电源的维护。方案三虽然将储能系统等分成两部分分别接入两段 400 V 母线, 进一步提高了系统的可靠性, 但对储能系统设备保护装置需求量多, 投资相比较较大, 造成后期工作人员检修和维护工作量大。

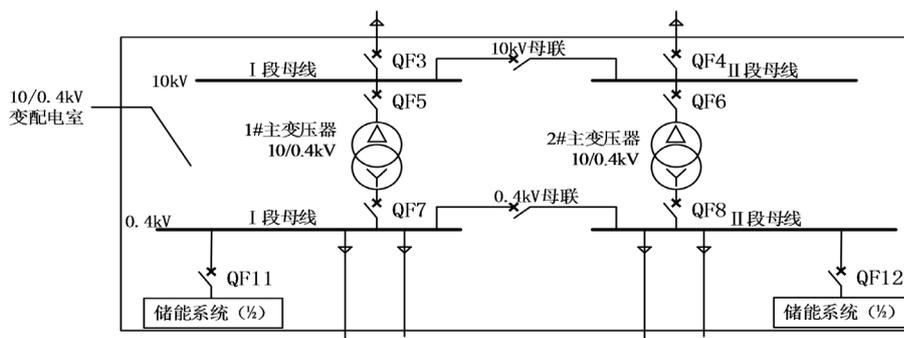


Figure 6. The energy storage system is divided into two parts and connected to two 400 V bus  
图 6. 储能系统等分成两部分分别接入两 400 V 母线

综合考虑供电可靠性、经济性以及安装运维等各方面因素, 采用方案三为接入方案较为合理。

### 3. 控制策略优化与设计

由 2.1 可知, 系统主接线主要采用两路电源进线以及单母线分段的接线方式, 母联开关设备自投, 2 路 400 V 电源进线分别取自上级变电所的不同母线, 变电所上级的 10 kV 亦选取单母分段接线, 母联开关备自投, 正常运行时, 两路母线分列运行, 锂电池储能系统处于充电运行状态, 当一路电源失电时, 失电母线段断开, 母联开关闭合, 失电母线段恢复供电, 但若因故, 失电母线并未恢复供电, 此时锂电

池储能系统将转换放电运行状态。

对储能系统的控制，使其实现与电网的双向功率传送，实际上就是要采用或优化具有适用性的储能逆变器的接入方式以及控制策略[3]。综合考虑文中特定负荷的大小、接入电压等级以及对可靠性和高效率的要求，如图 7 所示，本文锂电池储能系统的接入方式选择单级接入，锂电池堆经由三桥臂模块逆变后，通过输出滤波电路和隔离升压变压器并入三相交流电网[4]。

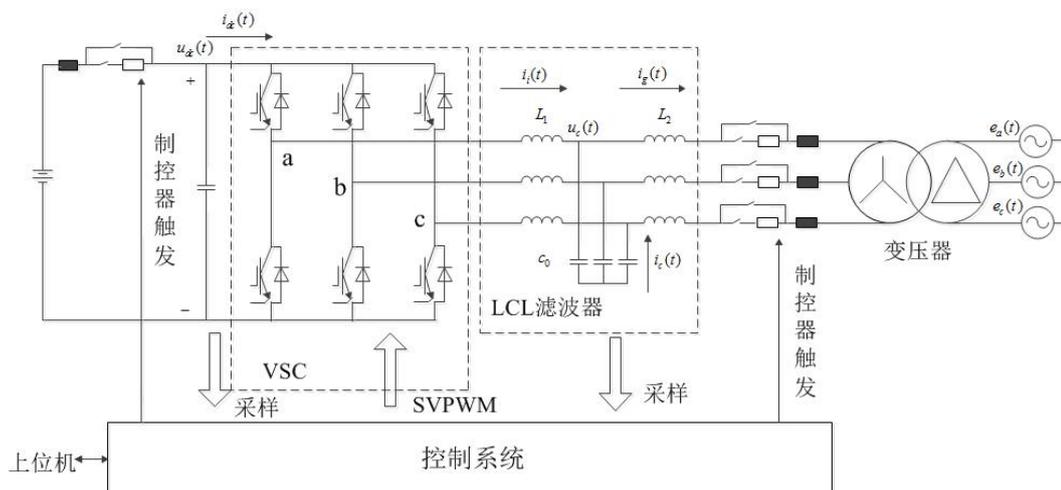


Figure 7. Lithium battery access mode structure  
图 7. 锂电池接入方式结构图

### 3.1. 储能系统整体控制策略

锂电池储能系统的整体控制流程如图 8 所示，其中运行指 PCS 系统在外围故障检测无故障时运行，信息采集过程主要包括电池 BMS 反馈的 SOC 值、系统的调度指令以及电池和交流侧电压、电流等信息。接下来进行控制判断，通过信息采集环节收集的信息进行判定，决定最终控制模式的选择[5]。这里最终的控制方式分为四种：电池的充电控制、电池放电控制、PQ 功率跟踪控制和 V/f 控制。电池的充放电控制主要依据的是电池管理系统(BMS)反馈的电池信息决定的；而 PQ 控制指令以及有功、无功的指令值大小可根据上级的调度指令，也可根据自身系统的电量采集来自动进行判断[6]。

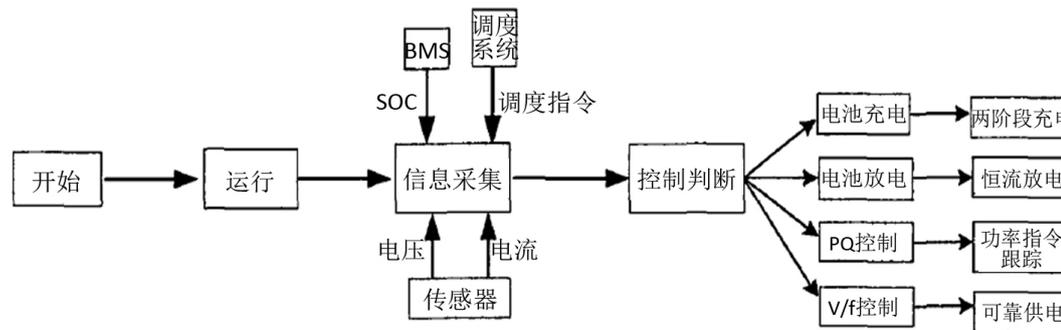


Figure 8. PCS system overall control process  
图 8. PCS 系统整体控制流程

### 3.2. 储能系统工作在充电模式下的控制策略

本文使用锂电池的恒流/恒压充电方式，充电初期采用恒定大电流充电模式，在锂电池电压达到设定

值后转为恒压限流充电模式，随着电池电压的不断上升，充电电流逐渐减小，最后通过充电电流的减小程度来判断充电是否结束[6]。充电后期采用小电流充电有利于减小恒定大电流充电对电池的损坏，同时锂电池电压的升高速率减缓有利于防止过充电。针对锂电池的恒流/恒压充电方式，可设定两种控制外环：电流外环和电压外环，分别可保证系统以恒定的电流或电压对电池进行充放电控制，从而不仅满足了电池充放电性能和快速性，而且兼顾了储能电池的循环周期和使用寿命[7]。

### 3.2.1. 恒流控制外环

当 PCS 工作在直流侧恒流充放电模式时，直流侧电流作为双闭环控制的外环，其控制结构如图 9 所示。 $i_{dc}^{*}$  表示系统给定的直流侧储能电池的充放电电流， $i_{dc}$  表示电池当前流过的电流值，两者的差值作为 PI 控制器的输入，经过 PI 环节后输出  $i_{dref}$  作为电流内环有功电流的给定值。

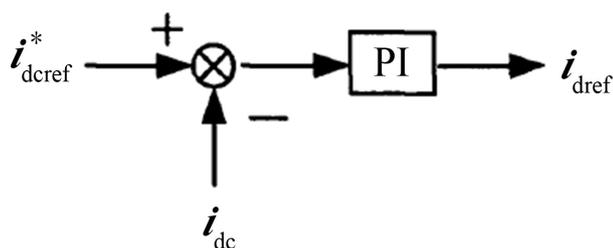


Figure 9. Constant current control outer loop design

图 9. 恒流控制外环设计

### 3.2.2. 恒压控制外环

当 PCS 工作在直流侧恒压充电模式时，以直流侧电压为被控量作为双闭环控制的外环，使储能电池的充电电压按照给定值进行充电，原理如图 10 所示。

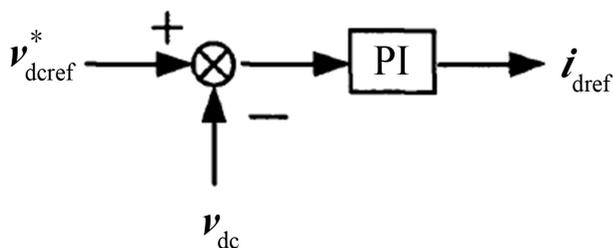


Figure 10. Constant voltage control outer loop design

图 10. 恒压控制外环设计

电池的两种充电模式切换控制框图如图 11 所示。切换控制主要根据电池返回的 SOC 值和电池端电压来进行控制，当电池 SOC 值大于 95%，且电池端电压  $V_{dc}$  接近于电池满充电压时进行切换。为了减小切换时可能出现的跳变，使两个外环控制器采用相同的限幅值，而且把切换时刻控制外环的输出值作为切换后控制外环的初始值，从而尽可能使切换过程平滑[8]。

## 3.3. 储能系统工作在放电模式下的控制策略

当电网中出现线路故障而失电时，为了保证关键负载的可靠供电，需要储能系统在放电运行模式下工作，向负载提供稳定的电压。此时储能系统的 PCS 脱离电网独立运行，故 PCS 应采用 V/f 控制策略，保证输出电压和频率的稳定。需要注意的是，由于 PCS 容量有限，在离网运行状态下，需要切除次要负荷，也就是系统的二级负荷，保证主要负荷的稳定工作，因此 V/f 控制要具备一定的动态响应速度，跟踪负

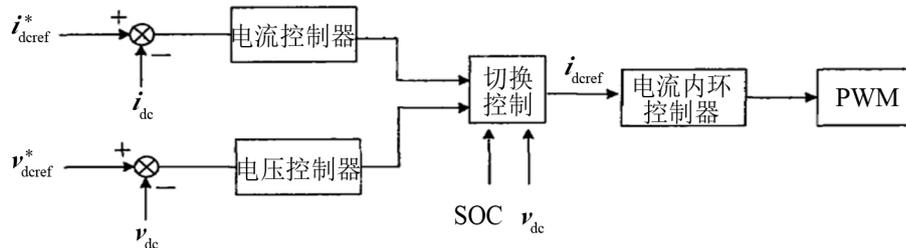


Figure 11. Charging mode switching control block diagram

图 11. 充电模式切换控制框图

荷的投切。

V/f 控制采用输出电压外环和电感电流内环的双闭环控制策略，如图 12 所示。电流内环主要是构成电流随动系统，从而能够加快系统的动态响应时间，而电压外环是瞬时电压外环，主要是为了保证输出电压的稳定，使输出电压具有较高的稳定精度。电压电流双闭环控制充分利用了系统的状态信息，不仅动态性能好，稳态精度也高。同时，电流内环增大了逆变器控制系统带宽，使得逆变器动态响应加快，对非线性负载扰动的适应能力加强，输出电压的谐波含量减小。

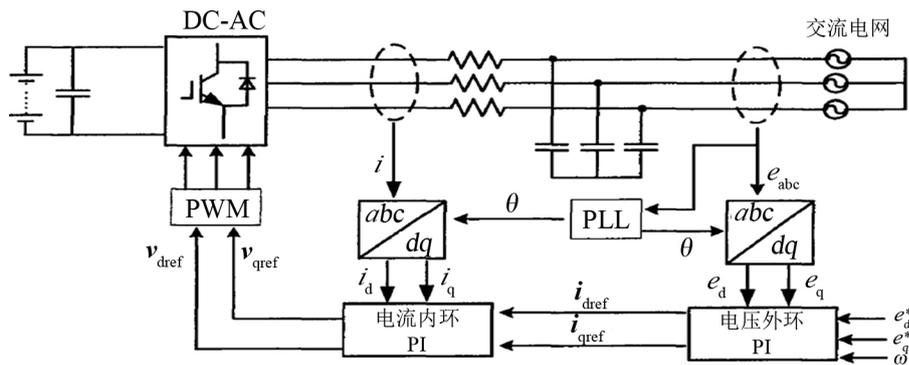
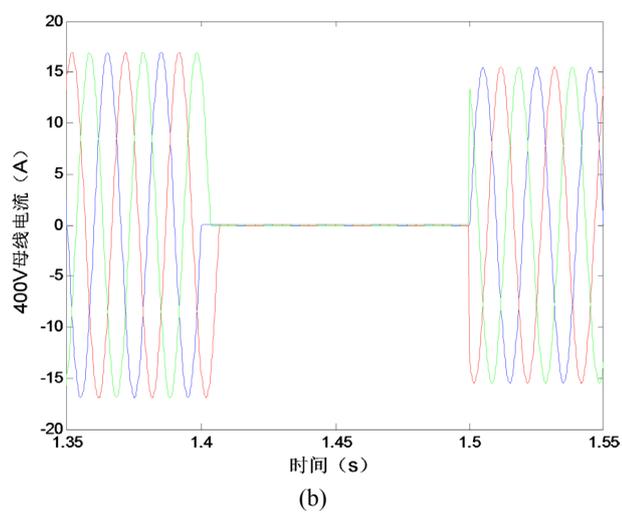
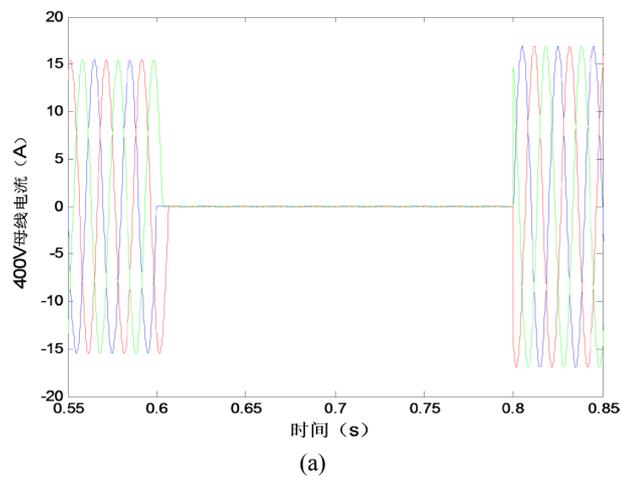


Figure 12. V/f double closed-loop of control strategy

图 12. V/f 控制双闭环控制策略

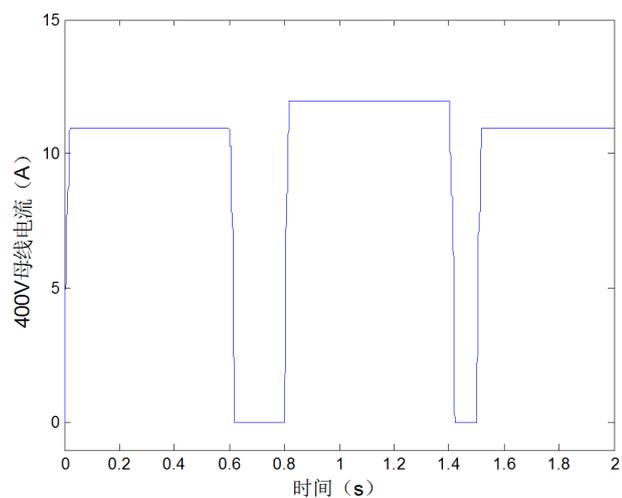
#### 4. 电磁暂态仿真与结果分析

本文基于 PSCAD 软件对该锂电池储能系统接入电网后的电网暂态过程进行了仿真分析，仿真过程中模拟了电力系统中常见的单相接地故障，如图 6 所示，正常运行状态下，该重要用户的负荷由低压母线 II 段供电，锂电池储能系统处于并网状态运行，在 0.6 s 时，低压母线 II 段失电，低压系统备自投通常采用带时限的低电压启动方式[8]。当设备自投检测到 400 V 母线侧 II 段母线失压，低电压继电器随即启动，经过 0.2 s 延时等待，若 II 段母线仍未恢复供电，系统中原本的备自投动作，若遇到自然灾害等紧急情况，此时低压母线 I 段在 1.4 s 时同时失电，锂电池储能系统经 0.1 s 的延时等待后，由并网充电运行状态转为孤岛放电运行状态，给该重要用户的 400 kW 负荷提供 1 小时的可靠供电，给低压母线足够的检修时间，当低压母线 I、II 段恢复供电后，储能逆变器的控制系统将控制锂电池储能系统从孤岛放电运行状态转为并网运行状态。图 13(a)和图 15(a)为单母分段主接线方式下备自投过程下的电流和电压瞬时值变化图，若突发单相接地故障，母线失压，相应的保护均动作，随之断路器跳闸，三相的电流和电压都降为零。图 13(b)和图 15(b)为两段母线同时失压的情况下，锂电池储能系统孤岛运行状态下的电流和电压的瞬时值变化图，图 14 和图 16 为这整个电磁暂态过程的电流和电压的有效值变化。



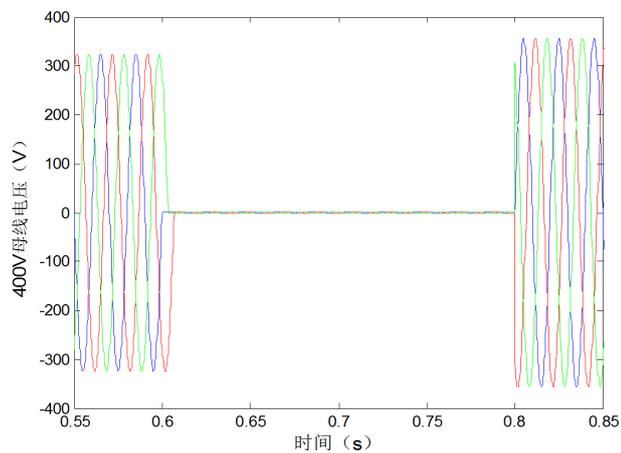
**Figure 13.** 400 V bus current three-phase instantaneous value of electromagnetic transient process

**图 13.** 电磁暂态过程的 400 V 母线电流三相瞬时值

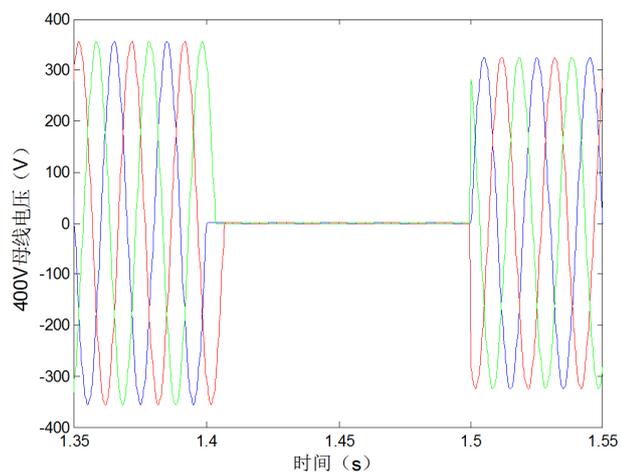


**Figure 14.** 400 V bus current RMS of electromagnetic transient process

**图 14.** 电磁暂态过程的 400 V 母线电流有效值



(a)



(b)

Figure 15. 400 V bus voltage three-phase instantaneous value of electromagnetic transient process

图 15. 电磁暂态过程的 400 V 母线电压三相瞬时值

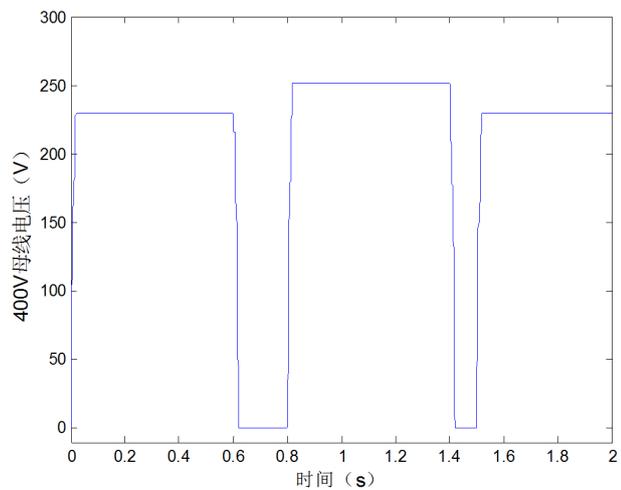


Figure 16. 400 V bus voltage rms value of electromagnetic transient process

图 16. 电磁暂态过程的 400 V 母线电压有效值

## 5. 结论

1) 锂电池储能是前景最优的储能方式之一, 本文在提升重要用户供电可靠的前提下, 根据给定的应用场合和负荷大小, 配置了电池管理系统, 选择了合适的储能逆变器的结构及控制策略, 为了提高电池组的运行效率和可靠性, 采用单级式接入方式, 给出了一套完整的锂电池储能设计方案。

2) 基于 PSCAD 仿真软件搭建了锂电池储能系统接入原单母分段系统接线图的拓扑图, 并对对象负荷用电故障的电磁暂态过程进行了模拟, 结果显示该储能系统能很好的与原系统配合, 进一步提高了该重要用户的用电可靠性, 对以后的实际工程具有参考意义。

## 参考文献

- [1] 蒋凯, 李浩秒, 李威, 程时杰. 几类面向电网的储能电池介绍[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 47-53.
- [2] 苏流. 锂电池储能系统的关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [3] 王永年, 杜预, 王成铭. 基于蓄电池的大容量储能系统设计[J]. 电器与能效管理技术, 2014(24): 48-53.
- [4] 张杰. 储能逆变器的控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽大学, 2017.
- [5] 戴梅芝. 双向储能逆变器控制及切换策略研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [6] 杜娟. 储能逆变器的控制方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [7] 宁莉莉. 双电源客户低压备自投装置功能改进[J]. 农村电气化, 2013(12): 15-16.
- [8] 公方涛. 380V 低压备自投装置分析及改进[J]. 科技创新导报, 2013(13): 24, 26.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8763, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [sg@hanspub.org](mailto:sg@hanspub.org)