

# 基于锂电池组的变电站直流系统接线方式及其运行

花盛<sup>1</sup>, 潘晓明<sup>1</sup>, 阚建飞<sup>2</sup>, 俞世清<sup>2</sup>

(1. 苏州供电公司, 江苏苏州 215004; 2. 南京工程学院, 江苏南京 211167)

**摘要:**以磷酸铁锂电池组作为后备电源的变电站直流系统, 不适合采用传统的接线方式。文中提出一种新的直流系统接线方式, 将馈电母线和充电母线分别设立, 配合快速切换开关, 解决在变电站直流系统中采用锂电池的问题。另外还讨论了新接线方式下直流系统的运行方式, 并通过一系列试验数据, 证明方案切实可行。

**关键词:**变电站; 磷酸铁锂电池组; 直流系统; 接线方式

**中图分类号:** TM912.9

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2013)04-0028-03

一种简单可靠的接线方式是变电站直流电源系统设计的基础。直流电源系统的各项技术指标, 尤其是系统可靠性, 与接线方式密切相关。传统上变电站直流电源的备用电源系统, 以铅酸蓄电池为储能元件, 工程技术人员经过多年的理论研究和实践探索, 为这种类型的直流电源系统, 确立了一种电池馈电拓扑结构, 基于这种拓扑结构的直流系统接线方式, 已经成为业内标准<sup>[1,2]</sup>。

随着锂电制造工艺的成熟, 环保无铅的锂电池替代铅酸电池是一种发展趋势。锂电池具有和铅酸电池不同的充放电特性, 简单地将蓄电池组更换为锂电池, 直流系统无法正常工作, 还可能造成锂电池组使用寿命快速衰减。必须为锂电池在变电站直流电源系统中的应用, 设计一种新的电路拓扑, 以适应锂电池的工作特性, 确保整个直流电源系统的高可靠性。

## 1 磷酸铁锂蓄电池组

磷酸铁锂电池单体的额定电压为 3.20 V; 荷电率大于 92% 时开路端电压 3.35 V; 充电终止电压 3.70 V; 放电至 20% 荷电率时电压大于 3.00 V; 放电终止电压为 2.50 V。标称电压为 220 V 的直流母线, 正常运行时允许 ±10% 的电压波动。分别按照蓄电池荷电率 20% 时, 母线电压为 -10% 偏差, 以及蓄电池荷电率为 92% 时, 母线电压为 +10% 偏差的条件计算串联电池的只数:

$$\frac{(1-0.1) \times 220}{3.00} = 66 \text{ 只}$$

$$\frac{(1+0.1) \times 220}{3.35} = 72 \text{ 只}$$

串联电池的只数应在 66 到 72 之间选取。在实际工程应用中, 从系统的可维护性考虑, 需要由设备生产厂家把多个锂电芯封装成一个电池包, 由施工人员在工程现场把几个电池包串接成一组。锂电池包技术

特性应尽可能的统一、规范, 同时也应兼顾 110 V 直流电源系统应用需求。综合考虑, 每个电池包由 17 只锂电单芯串接, 是比较适宜的选择。220 V 电池组, 由 4 个电池包组成, 共有 68 只电池单体串联而成。按这种方式构成的电池组, 在几种典型状态下的端电压如表 1 所示。

表 1 典型状态下电池组的端电压 V

状态	电池组端电压值
充满备用	$3.35 \times 17 \times 4 = 227.8$
荷电 20%	$3.00 \times 17 \times 4 = 204$
充电终止	$3.70 \times 17 \times 4 = 251.6$
放电终止	$2.50 \times 17 \times 4 = 170$

从表 1 可以看出, 充电时磷酸铁锂电池组的端电压超出规程关于最高母线电压 242 V 的规定, 不能直接输出到馈电母线, 必须对直流系统主接线进行特殊设计。

## 2 直流系统接线方式

采用铅酸蓄电池组的变电站直流系统, 典型的接线方式如图 1 所示。

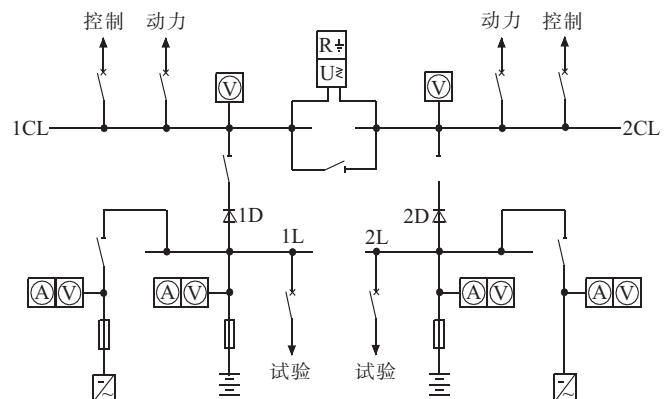


图 1 铅酸蓄电池直流系统接线方式

这种接线方式在生产实践中具有广泛的应用, 但是如前文所述, 磷酸铁锂电池组的最高端电压高于 242 V 的上限, 不能直接输出到馈电母线。依据文献[1]及磷酸铁锂电池的技术特性, 在典型设计 GDZW40 的基础上, 提出一种新的直流系统接线方式, 如图 2 所示。

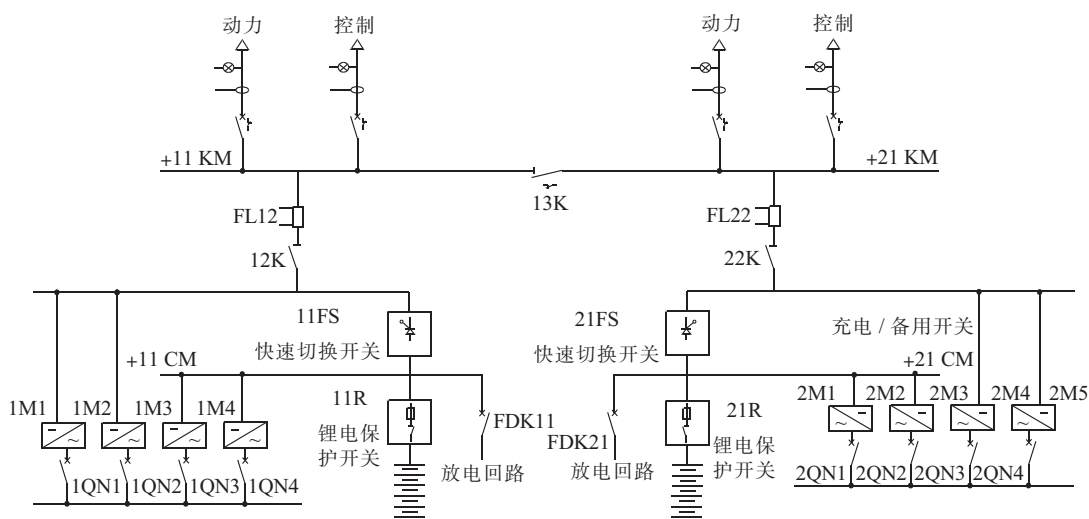


图2 磷酸铁锂电池组直流系统接线方式

这种接线方式下,整个直流电源系统由2组磷酸铁锂蓄电池、2组整流器组成,直流母线为单母线分段式,和图1所示接线方式比较,具有显著区别。

新的接线方式将馈电母线与充电母线分开,其间采用快速切换开关相连。磷酸铁锂电池组在充电时,电池组端电压较高,不能像铅酸蓄电池一样直接并联在直流母线长期浮充电。两类母线分开之后,馈电母线配置2个20A高频开关整流模块并联工作,自均流,以恒压限流模式运行,直流稳压值为223V,稳压精度0.5%,限流值为20A。2个20A模块的电流输出,可以满足正常的直流负荷。

充电母线另外配置2个20A高频开关整流模块并联工作,专门为磷酸铁锂电池充电。磷酸铁锂电池比较适宜的充电电流,为1小时放电电流的0.3倍,对于容量为100A·h的电池组,这一充电电流值为30A,2个模块所能提供的充电电流满足正常充电需求。馈电母线和充电母线分别设立,可以允许不同的母线电压范围,既保证了磷酸铁锂电池的正常充电,又使得馈电母线电压不超过正常范围。两类母线上的各自的双整流模块配置,满足“1+1”的备用原则。

### 3 直流系统运行方式

两类直流母线分别设立后,仍然必须保证在变电站的自用交流供电失去时,直流系统能够平滑切换到由备用蓄电池提供电源。这由系统的动态电源路径管理实现。动态电源路径管理通过控制快速切换开关,确保在各种不同运行条件下,直流馈电母线的持续稳定供电。

#### 3.1 整流供电

交流供电正常情况下,交流电源经馈电整流模块向直流负载提供电流,馈电母线电压由馈电整流模块的输出电压决定。考虑到连接馈线上的压降,整流模

块输出电压,通常比额定电压略高,典型的数值为223V。磷酸铁锂电池组在充满电后,充电整流模块处在待机状态,快速切换开关进入零电流隔离状态,将充电母线与馈电母线隔离,保护蓄电池组不会因为继续充电而受损。

#### 3.2 冲击负荷

当馈电支路上出现短路,或者出现较大的合闸操作电流时,直流母线的电压应保持足够稳定,以保证符合规程内有关冲击放电曲线的规定。铅酸蓄电池直接并联在母线上浮充电的传统接线方式,就考虑了当直流系统出现上述冲击性负荷时,由电池组补充提供临时需要的瞬态大电流,以便维持直流母线电压的稳定。新的接线方式下,虽然磷酸铁锂电池组采用了不同的备用方式,当出现冲击负荷时,位于蓄电池组与馈电母线之间的快速切换开关自动导通,由磷酸铁锂电池组提供超出在馈电整流模块输出电流的额外电流,确保在外部冲击负荷时维持母线电压稳定。

#### 3.3 电池供电

当外部交流电源失电时,处于隔离状态的快速切换开关变为导通状态,电池组向馈电母线提供负荷电流。馈电母线电压随电池放电过程,在规程容许的范围内有一定变化。就68串电池组而言,电池组荷电率从95%变化至15%时,所对应的电压变化在227~203V之间,符合相关技术规范对母线电压的要求。

#### 3.4 电池充电

在交流电源正常供电时,充电整流模块组经充电控制开关对蓄电池组进行充电,充电母线电压在170~252V之间。充电母线上的电压与馈电母线上223V馈电电压,被快速切换开关隔离,互不影响。充电模块在电池管理系统(BMS)控制下为磷酸铁锂电池组充电。根据文献资料<sup>[3,4]</sup>和电池生产厂的建议,锂电池组采用恒流限压模式充电,充电电流由电池管理

系统给出,限压值设置为 252 V。充电模块在电池组电压达到 252 V 后,继续对电池组进行一段时间的脉冲充电,以充分利用电池容量。充电过程中交流供电突然失去,直流系统会自动转入电池供电的运行状态,直流系统供电连续性不受影响。

#### 4 系统试验

按照国家标准<sup>[5]</sup>对采用新型接线方式的磷酸铁锂电池直流系统进行试验,试验数据表明:这种直流系统的特性符合国家标准,其冲击负荷下的电压稳定性明显优于采用铅酸电池的系统。在交流供电失去时直流馈电母线电压的波形如图 3 所示。从图 3 可看出交流供电电源的变化,不影响直流供电的连续性。在交流失电瞬间,直流馈电母线上电压的微小上升,是由于蓄电池组的输出电压,略高于高频整流馈电模块的输出电压。这种微小的波动小于国家标准规定的范围。

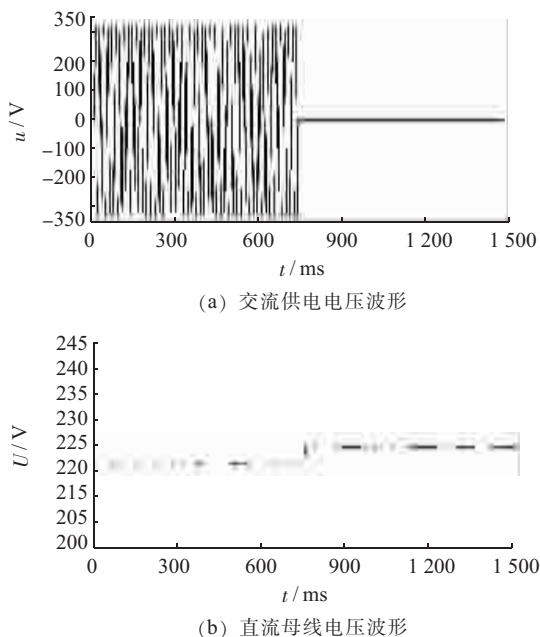
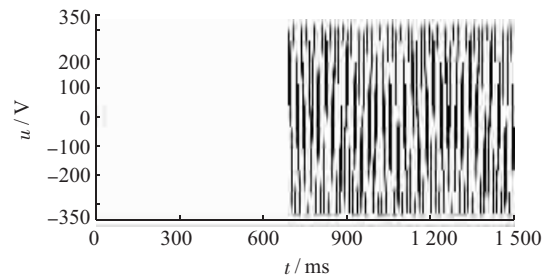


图 3 交流供电失去时的直流馈电母线电压

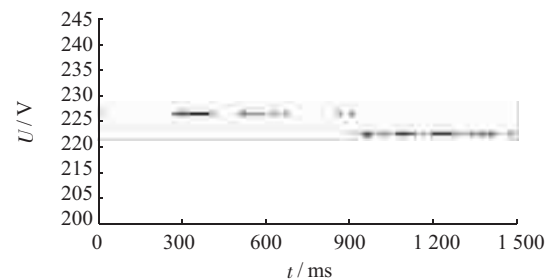
在蓄电池组供电情况下,交流供电恢复,系统自动转为使用整流模块输出提供直流馈电时,馈电母线的电压变化情况如图 4 所示。由图 4 看出,在交流恢复后,经过短暂的延时,等待馈电模块启动完毕,直流母线电压有微小的降低,这表明蓄电池同直流馈电母线隔离,系统改由整流模块供电。电压的变动范围和图 3 所示相同,只不过电压的变动方向相反。

#### 5 结束语

磷酸铁锂电池的充放电特性与铅酸电池不同,需要设计一种新型接线方式,并保证这种接线方式之下



(a) 交流供电电压波形



(b) 直流母线电压波形

图 4 交流供电恢复时的直流馈电母线电压

的各种运行特性满足变电站的实际运行需要。针对变电站直流系统的应用环境,提出一种新的接线方式,将充电母线与馈电母线分别设立,采用快速切换开关保证交流供电、直流供电和充电状态下,直流供电母线的电压始终处于规程要求的范围之内。动态电源路径的管理方法,使得磷酸铁锂电池组在充电过程结束后,不必长期工作在对其不利的浮充电状态下,从而解决了磷酸铁锂电池在变电站直流系统中应用的一个关键问题。

#### 参考文献:

- [1] DL/T 5044—2004, 电力工程直流系统设计技术规程[S].
- [2] 白忠敏,刘百震,於崇干. 电力工程直流系统设计手册[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [3] 武雪峰,王振波. LiFePO<sub>4</sub>/C 电池循环性能和安全性能的研究[J]. 电池工业,2010(15):156-159.
- [4] 徐伟. 磷酸铁锂动力电池充电方法研究和均衡充电模块的设计[D]. 重庆:重庆大学,2010.
- [5] GB/T 19826—2005, 电力工程直流电源设备通用设计条件及安全要求[S].

#### 作者简介:

- 花盛(1976),男,江苏常熟人,工程师,从事变电站直流系统运维管理工作;  
潘晓明(1977),男,江苏苏州人,工程师,从事变电站直流系统检修管理工作;  
阚建飞(1965),男,江苏如东人,副教授,从事计算机应用研究与教学工作;  
俞世清(1964),男,江苏江阴人,工程师,从事电力工程直流电源系统研究工作。

- 究[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 61-65.
- [3] CHINCHILLA M, ARNALTES S and BURGOS J C. Control of Permanent Magnet Generators Applied to Variable-speed Wind-energy Systems Connected to the Grid [J]. IEEE Trans. Energy Convers., 2006, 21(1): 130-135.
- [4] 柳 伟, 顾 伟, 孙 蓉, 等. DFIG-SMES 互补系统一次调频控制 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 108-116.
- [5] 马竹梧, 柳 伟, 王功胜. 变频技术与装置应用若干问题的探讨 [J]. 电气应用, 2011, 30(24): 16-19.
- [6] RODRIGUEZ A J L, ARNALTE S, BURGOS J C. Automatic Generation Control of a Wind Farm with Variable Speed Wind Turbines [J]. IEEE Trans. Energy Convers. 2002, 17(2): 279-284.
- [7] LALOR G, MULLANE A, O'MALLEY M J. Frequency Control and Wind Turbine Technologies [J]. IEEE Trans. Power Syst. 2005(20): 1903-1913.
- [8] MAURICIO J M, MARANO A, GOMEZ E A, et al. Frequency Regulation Contribution Through Variable-speed Wind Energy Conversion Systems [J]. IEEE Trans. Power. Syst. 2009, 24(1): 173-180.
- [9] HOLDSWORTH L, EKANAYAKE J B, JENKINS N. Power System Frequency Response from Fixed Speed and Doubly Fed induction Generator-based Wind Turbines [J]. Wind Energy, 2004, 07(1): 21-35.
- [10] EKANAYAKE J, JENKINS N. Comparison of the Response of Doubly Fed and Fixed-Speed Induction Generator Wind Turbines to Changes in Network Frequency [J]. IEEE Trans. Energy Convers, 2004, 19(4): 800-802.
- [11] 曹 军, 王虹富, 邱家驹. 双馈恒频风电机组频率控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 78-82.
- [12] KEUNG P K, LI P, BANAKAR H, et al. Kinetic Energy of Wind Turbine Generators for System Frequency Support [J]. IEEE Trans. Power Syst., 2009, 24(1): 279-287.
- [13] KAYIKCI M, MILANOVIC J. Dynamic Contribution of DFIG-based Wind Plants to System Frequency Disturbances [J]. IEEE Trans. Power Syst, 2009, 24(2): 859-867.
- [14] MORREN J, HAAN S W H, KLING W L, et al. Wind Turbines Emulating Inertia and Supporting Primary Frequency Control [J]. IEEE Trans. Power. Syst, 2006, 21(1): 433-434.

作者简介:

郭 炜(1978), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定和微电网;

孔维君(1988), 女, 江苏淮安人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定和电力系统运行控制;

柳 伟(1985), 男, 江苏泰兴人, 博士研究生, 研究方向为可再生能源、微电网和电力系统运行控制。

## Research on Primary Frequency Regulation Characteristic of Wind Turbine

GUO Wei<sup>1</sup>, KONG Wei-jun<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>3</sup>

(1. Electric Power Economic and Technological Research Institute of Jiangsu Electric Power Corporation, Nanjing 210008, China; 2. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210009, China; 3. Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The frequency control abilities of the Fixed Speed Induction Generator (FSIG), Variable Speed Induction Generator (VSIG) and the synchronous generator are compared and studied to achieve a more comprehensive analysis of frequency control characteristic of different kinds of wind turbines. Based on the above analysis, an auxiliary frequency controller is designed for variable speed wind turbine to improve the frequency control ability of variable speed induction generator. Simulation about the frequency control abilities of different generators is carried out on PSCAD/EMTDC platform, verifying the effectiveness of the auxiliary frequency controller.

**Key words:** FSIG; VSIG; synchronous generator; primary frequency control; auxiliary frequency controller

(上接第 30 页)

## The Connection Mode and Operation of DC Power System Based on Li-ion Batteries in Transformer Substation

HUA Sheng<sup>1</sup>, PAN Xiao-ming<sup>1</sup>, KAN Jian-fei<sup>2</sup>, YU Shi-qing<sup>2</sup>

(1. Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, Jiangsu, China;  
2. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** The traditional connection mode of DC power system in transformer substation is unsuitable when the backup power is based on LiFePO<sub>4</sub> batteries. The new connection mode of DC power system which separates power supply bus from batteries charge bus using an instant switch is proposed in this paper to resolve that problem. Besides, the operation of DC system under new connection mode is discussed. The data of experiment has proved that the new connection mode is feasible.

**Key words:** substation; LiFePO<sub>4</sub> batteries; DC system; connection mode