

基于柔性直流互联技术的配电网台区绿色低碳能源转型实践

卢峭峰

国网天长市供电公司

摘要：为解决资源配置效率低下、增容空间不足、相邻台区负载率差异大和配网调节能力不足等问题，采用屋顶建设分布式光伏发电采用直流汇流形式直接接入母线，实现全额上网直流发电，实现台区新能源电力系统随机波动的削峰填谷，提升了供电台区安全性、稳定性、可靠性和经济性。

关键词：柔性直流技术；光伏发电；低碳能源

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.24.068

引言

为解决此类在发展中遇到的棘手问题，天长供电公司利用柔性直流技术在龙岗街北变、街中变、街南变、党校1#变压器、2#变压器之间通过低压柔性换流阀连接到直流750V母线。在党校屋顶建设的323.4kWp分布式光伏发电系统中，采用直流汇流形式直接接入DC750V母线，实现全额直流发电上网。同时在党校2#变处配置250kW/500kWh磷酸铁锂储能系统，龙岗中街抗大八分校广场安装5台5G智慧路灯，利用停车位建设2套120kW双枪一体直流充电桩，10套7kW单枪交流慢充电桩以及20台光伏座椅等经济技术手段。

一、柔性直流互联配电网台区改造解决配网调节能力不足等问题

系统通过党校1#变压器下的250kW AC/DC来建立直流750V母线，其他AC/DC和DC/DC并入直流母线，若党校1#变压器断电，切换为DC/DC储能建立750V直流母线。整体系统通过EMS管理系统协调控制，系统网架结构如图1所示。

在低压台区之间，安装低压柔性换流设备连接5台变压器400V交流母线，通过中央控制器对两台区间潮流方向和大小进行精准控制，实现相邻台区能源互济。根据台区配变容量配置低压换流设备，两套换流设备间通过750V动力直流母线实现功率相连。

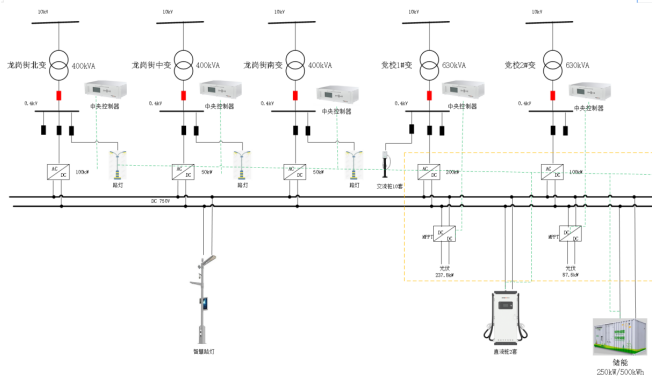


图1 低压柔直用能互补方案系统网架结构图

柔性直流换流原理如图2所示。当两台区负荷都较轻或者都较重时，低压柔直系统待机；当一台台区负荷较重，另一台区负荷较轻时，通过低压柔直系统引导潮流从负荷较轻台区转移到负荷较重台区，缓解负荷较重台区线路及变压器等电器的设备压力，保证台区配电系统长期可靠稳定运行。

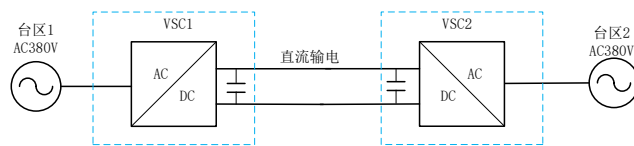


图2 柔性直流换流原理图

（一）光伏发电系统

工程总装机容量共323.4kWp，共2~12串接入一台直流汇流箱，通过直流汇流后接入光储一体设备直流接入母线，再通过光储一体化设备实现逆变上网或者直接DC/DC对储能电池充电。

屋顶光伏发电系统利用建筑屋面的优势、建立的光伏电站具有安全可靠、无噪声、无污染的特点，不但具有光伏发电的基本功能，也增加了建筑的美感，还改善了屋面的隔热状况、增加了中间流通的空气和减少了阳光直射，减少了夏季的降温成本和冬季的采暖费用。

（二）储能系统

项目在党校2#变处配置250kW/500kWh磷酸铁锂储能系统，采用集装箱尺寸为5898mm×2352mm×2393mm，中间通过隔热层分为配电室和电池室，其中电池室含电池、电池架、消防柜、BMS、空调及照明和烟感等设备；配电室含1套光储一体化设备、照明和烟感等设备。

储能系统可跟踪可再生能源发电输出的曲线，同步参与削峰填谷，使其输出变成一个可控曲线，方便电网电度，减少对电网的冲击。

单独的光伏电站受到时间和地域的约束，难以与其它光伏电站或其他能源形式的电站形成有效的互补系统，其波动性和间歇性较大。除了增加光伏电量在用户内部消纳率外，在光伏电站内部配置储能系统，能够有效改善光伏发电单独输出电力时对系统稳定性和可靠性的影响，使光伏电站成为一种绿色、友好的可再生能源发电形式。

（三）充电桩建设

项目利用停车位建设2套直流充电桩，用于满足旅游大巴充电需求和员工通勤车辆快速充电需求。建设交流充电桩10套，用于满足员工车辆充电需求共计覆盖14个停车位。

所有充电桩均接入运营管理平台，实现运行管理全

方位监控。

(四) 直流智慧路灯建设

项目在龙岗中街抗大八分校广场建设3座5G智慧路灯,在烈士陵园建设2座5G智慧路灯以实现智能照明。

5G智慧路灯不仅具有普通路灯的照明功能,灯杆上面还安装了摄像头、液晶显示屏、路由器和灯箱等,集城市信号通讯、温湿度传感器等多功能于一体,承载了多种5G创新智慧应用功能。

(五) 光伏座椅建设

项目在天长党校内建设20套光伏座椅以实现景区游人的智能歇息就坐。光伏座椅自带智慧储能系统,保证了座椅自身用电需求,同时可实现无线充电功能,还可增设环境监测、智能恒温系统,无线WIFI等功能。

二、储能系统电池模型建立及参数辨识

在光伏发电储能系统中,必须考虑蓄电池的寿命问题,否则将可能使改造得不偿失。电池寿命的估算方法需要建立在正确建模基础之上,常用电池模型主要有等效电路模型、经验模型、电化学模型和神经网络模型等。其中等效电路模型能够表示电池的输出特性和内部参数关系,可以用来预测电池的荷电状态SOC、健康状态SOH等参数^[1]。下面选用二阶RC模型作为电池模型,进行简单介绍,如图4所示。

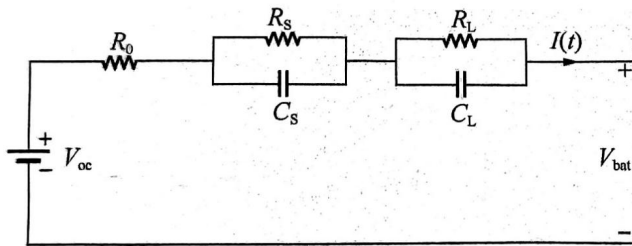


图4 蓄电池二阶RC等效电路模型

根据二阶RC模型的电路图,可得系统在频域下的状态方程为:

$$V(S) - V_{oc}(S) = -I(S) \times \left(R_0 + \frac{R_s}{R_s C_s s + 1} + \frac{R_L}{R_L C_L s + 1} \right) \quad (1)$$

令 $V'(S) = V(S) - V_{oc}(S)$, 求解相应的传递函数:

$$G(S) = \frac{V'(S)}{I(S)} = \left(R_0 + \frac{R_s}{R_s C_s s + 1} + \frac{R_L}{R_L C_L s + 1} \right) \quad (2)$$

令 $s = \frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}$, 其中T代表采样时间,对式(2)进行Z变换,如式(3)所示。式中 p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 表示待定系数,分别如式(4) — (8)所示。

$$G(z^{-1}) = \frac{l_3 + l_4 z^{-1} + l_5 z^{-2}}{1 - l_1 z^{-1} - l_2 z^{-2}} \quad (3)$$

$$p_1 = \frac{2R_L C_L - T}{2R_L C_L + T} + \frac{2R_s C_s - T}{2R_s C_s + T} \quad (4)$$

$$p_2 = \frac{(T - 2R_L C_L)(2R_s C_s - T)}{(2R_L C_L + T)(2R_s C_s + T)} \quad (5)$$

$$p_3 = -\left(R_0 + \frac{TR_s}{2R_s C_s + T} + \frac{TR_L}{2R_L C_L + T} \right) \quad (6)$$

$$p_4 = \frac{R_0(2R_L C_L - T)}{2R_L C_L + T} + \frac{R_0(2R_s C_s - T)}{2R_s C_s + T} - \frac{TR_s}{2R_s C_s + T} - \frac{TR_L}{2R_L C_L + T} - \frac{TR_s(T - 2R_L C_L) + TR_L(T - 2R_s C_s)}{(2R_L C_L + T)(2R_s C_s + T)} \quad (7)$$

$$p_5 = \frac{R_0(2R_s C_s - T)(2R_L C_L - T) - TR_L(2R_s C_s - T) - TR_s(2R_L C_L - T)}{(2R_L C_L + T)(2R_s C_s + T)} \quad (8)$$

使用蓄电池试验获得的电流I、端电压V等数据作为输入量,可求得 p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 等待定系数,即可推出电路模型中的参数 R_0, R_s, R_L, C_s 和 C_L , 表达式如式(9) — (13)。

$$R_0 = \frac{-p_3 + p_4 - p_5}{1 + p_1 - p_2} \quad (9)$$

$$R_s C_s R_L C_L = \frac{T^2(1 + p_1 - p_2)}{4(1 - p_1 - p_2)} \quad (10)$$

$$R_s C_s + R_L C_L = \frac{T(1 + p_2)}{1 - p_1 - p_2} \quad (11)$$

$$R_0 + R_s + R_L = \frac{-p_3 - p_4 - p_5}{1 - p_1 - p_2} \quad (12)$$

$$R_0 R_s C_s + R_0 R_L C_L + R_L R_s C_s + R_s R_L C_L = \frac{T(p_5 - p_3)}{1 - p_1 - p_2} \quad (13)$$

三、柔性直流互联配电台区改造

对于光储系统来说,利用龙岗党校屋顶建设323.4kWp屋顶分布式光伏发电系统通过储能系统调节实现新能源光伏发电100%消纳;储能系统在电价谷时进行充电,在电价峰时供给负载使用,从而减少电量电费支出,同时还能够平衡电网负荷峰值,起到延缓电网线路扩容的投资的作用。

通过柔性互联以及储能的配置,光储系统实现以下六大功能:

(1) 台区间功率灵活互济:五台配电变压器互为“热备用”,且通过中央控制装置均衡调节各个配变负载率,在无需投资增容的前提下,提高台区变压器的负载率利用率,实现了变压器的最经济运行。

(2) 台区间故障快速转供:通过智能调度控制技术实现“毫秒级”备用容量快速投入,保证了重要负荷、高端负荷的供电可靠性。

(3) 台区内动态无功补偿:通过潮流灵活控制,提供实时快速无功补偿,台区无需额外配置无功补偿装置,充分保障电能质量。

(4) 分布式电源高效消纳:解决了分布式电源接入后末端电压过高的问题,实现电压主动控制。

(5) 冲击性负荷稳定供电:通过对光伏、储能装

备的集中控制,实现了在冲击性负荷下的削峰填谷,可以有效缓解台区尖峰负载率。

(6) 能量优化与经济运行:对于不同台区内的源-网-荷-储进行并、离网统一管控,优化系统运行工况,提高清洁能源消纳效率,实现了高弹性电网源-网-荷-储高效互动。

通过低压配电台区的交直流互联,实现配网末端系统正常运行时动态增容和故障情况下的转供电,提升了供电可靠性和分布式电源的接纳能力。通过低压交直流灵活组网,实现了柔性高效互动目标,为配电网的经济和可靠运行提供了一种新的技术手段。

汽车充电桩采用国网标准0.5级高精度计量电能表,在满足旅游大巴车充电需求和员工通勤车辆充电需求的同时,具备实时计量充电车辆消耗电量,自动结算的功能;将汽车充电桩接入运营管理平台,实现运行管理全方位监控。

景区路灯采用5G智慧路灯,做到节能降耗。智慧路灯不但可用于景区照明,也可以附带的LED显示屏用于乡镇广宣和通知信息的发布,还可以用于商业用途,如LED显示屏广告收益和5G微基站出租收益等,增加景区收入。

(一) 柔性直流互联配电台区改造的社会效益

项目合理利用屋顶空间光伏发电运行时不需要消耗煤、石油和天然气等不可再生能源的优点,减少二氧化碳、二氧化硫等有害物资的排放。龙岗抗大八分校景区的年用电量约为4万千瓦时,项目光伏年发电量约为35万千瓦时,光伏发电产生的电能远超所需用电量,不但无需向景区输送电能,还能通过光伏发电项目向外输送绿色电能,助力打造低碳“红色景区”。

通过以龙岗抗大八分校景区为代表的示范点建设,在全省推广包括柔直互联微电网群的控制策略和系统应用,形成具有安徽省特色的多台区柔直互联工程配电网建设应用样板和示范工程。利于实现红色景区与新型能源融合,结合红色景区的特点,充分利用自然资源,因地制宜建设分布式光伏发电、风力发电等新能源发电装置,采用高效储能、新能源汽车充电桩等设备以提高能源利用率,提升清洁能源消纳水平,建设“源-网-荷-储”协同的智能微电网,探索从规划设计到建设运营的全周期新能源友好接入、综合利用的典型方案,实现景区能源系统内循环。

项目研究成果以及方案可以推广至未来配变台区的建设中,广泛应用于大量分布式新能源发电、储能和可控负荷的场景,助力于构建以新能源为主的新型电力系统建设,助力于“碳达峰、碳中和”目标的实现^[2]。

由此可见,项目的实施具有良好的经济效益、环境效益和社会效益。

(二) 柔性直流互联配电台区改造的经济效益

1. 光伏发电系统收益测算

项目利用龙岗党校屋顶建成323.4kWp屋顶分布式光伏发电系统,通过储能系统调节实现新能源光伏发电100%消纳,参考安徽省电网2023年4月份光伏发电综合电价为0.3844元/kWh,光伏系统25年发电量为847.83万kWh,电费总计325.9万元,年均收益10.86万元。

2. 储能系统收益测算

按照目前安徽省平段电价0.66645元/kWh计算,安徽的峰值电价为1.11913元/kWh,谷值电价为0.29155元/kWh,峰谷价差0.82758元/kWh。本项目配置储能电池容量为500kWh,按照放电深度90%DOD计算,系统效率按照95%进行考虑,单次峰谷套利电量为427kWh。采用夜间利用谷值时间段进线充电,在日间早高峰放电供党校使用,单日可套利427*0.82758=353元,在日间光伏高发时间段使用光伏发电系统对储能系统进行充电,以供晚高峰使用,按照安徽省电网2023年4月份光伏发电综合电价0.3844元/kWh计算,单日可套利427*(1.11913-0.3844)=313元。将储能系统运行于峰谷套利模式,平均每日可以产生收益353+313=666元,按照储能系统年利用系数90%考虑,则储能系统年收益为21.8万元,预计第六年收回成本,储能系统十年期收益率共计218万元。

3. 潜在经济效益

随着碳达峰、碳中和进程的加快,大量分布式新能源陆续接入,传统大电网的稳定性面临着巨大挑战。同一区域内经济结构内,这种不一致会导致台区负载差距较大的问题,大量台区存在重负载和过电压风险,而又不能通过增容布点投资来解决,同时也存在负载较轻却未能充分利用容量的台区。

项目通过源网荷储直流柔性互联系统进行配电台区改造,降低了新能源并网和随机充电负荷对大电网的依赖和冲击,有效的缓解了大电网的波动。大力开发和运用直流柔性互联微电网系统,不仅能够将分布式电源与新型能源进行连接,还能实现电力负荷能源的再利用,提高了电力企业电能供给量。对负荷进行多种能源形式的可靠供给,是对电力系统改革的有效手段,也是建设以新能源为主的新型电力系统的必经阶段。同一区域多个台区间通过互联互通,可以在一定程度上提高台区间负荷均衡和能量优化的能力,缓解电网升级改造的压力。在低压台区系统通过柔性直流技术对多个台区实施互联互通,将是改变台区运营现状、多维度提升台区供电水平、实现台区高级应用功能的全新方案。

四、结语

综上所述,项目通过以龙岗抗大八分校景区为代表进行示范点建设,在全省推广包括柔直互联微电网群的控制策略和系统应用,推动天长市区域配电网转型升级,形成具有安徽特色的多台区柔直互联工程配电网建设应用样板和示范,研究成果以及方案可以推广至未来配变台区建设中,可广泛应用于大量分布式新能源发电、储能和可控负荷的场景,助力于构建以新能源为主的新型电力系统建设,助力于“碳达峰、碳中和”目标的实现^[2]。由此可见,本项目的实施具有良好的经济效益、环境效益和社会效益。

参考文献

- [1]李亚飞.增程式电动汽车用锂离子动力电池寿命的估算与优化研究[D].华南理工大学,2015.
- [2]胡道成,张帅,韩涛等.碳中和目标下发电领域低碳转型路径[J].洁净煤技术,2022(28-7):23-33.