

一种适用于偏远环境的模块化智能箱变系统

赵 顺¹ 王万银¹ 何 欢¹ 刘书晗¹ 王天阔² 银 铭³

(1. 华电重庆新能源有限公司 2. 华电电力科学研究院有限公司

3. 国电南京自动化股份有限公司)

摘要：分布式新能源发电技术正日益成为未来电网发展的核心趋势，为了解决偏远地区风电箱变在供电和运维方面的挑战，本文提出了一种适用于偏远环境的智能箱变系统方案。该方案从拓扑结构、控制、保护、接地设置以及通信等方面详细阐述了设计思路。结合低压直流的配电结构，提出的智能箱变系统解决方案能够满足偏远地区风电箱变的运维需求，同时高效可靠地嵌入低压直流配电方案，确保系统稳定运行。此系统具备智能调节功率和动态需求响应等功能。同时，所提方案支持模块化设计和搭建，具有高度灵活性和可自由拓展性。

关键词：智能箱变；集中控制；低压直流；直流保护

0 引言

分布式新能源发电技术是一种革命性的能源生产模式，摆脱了传统的中心化发电，利用太阳能光伏板、风力发电等分散的小型装置发电。这些装置可安装在屋顶、农田、山丘等地，已成为电网发展的重要趋势。随着交通和供热等领域的电气化，分布式发电技术的应用前景广阔，能够为电动车提供清洁能源，并通过新能源供热减少对化石燃料的依赖，促进可持续发展^[1]。与传统能源相比，新能源具有更低的环境影响和更长的使用寿命，这为传统电力设备的运维和监测提供了便利。由于新能源装置通常具有较低的碳排放和更少的机械部件，其维护和保养成本通常较低，运行稳定性也更高。此外，新能源装置的生命周期通常更长，能够持续提供可靠的电力供应，减少了

对电力设备的频繁维修需求。

风力发电技术已经十分普及，然而风力发电的电力设备的运行维护存在诸多困难。许多风力发电场位于偏远地区或海上，这些地区的交通不便，基础设施相对薄弱，给维护工作带来了很大的挑战。维护人员需要经常穿越山区、沙漠或海域等复杂的地形和气候条件，增加了维护的难度和成本。一些风电场建在高海拔地区，维护人员需要面对高原缺氧、气温骤变等极端天气条件，这增加了维护的危险性和难度。同时，风电场通常位于开阔的地区，暴风雨、雪灾等极端天气可能会对箱变等设备造成损坏，维护人员需要在恶劣的天气条件下进行工作，增加了安全风险。除此之外，风电箱变等设备通常由大量的机械、电子和电气部件组成，维护涉及多个专业领域，需要维护人

员具备多方面的技能和经验。偏远地区的网络覆盖可能较差，导致数据通信困难，难以实时监测设备运行状态，增加了故障排查和维护的难度。由于维护人员需要跨越距离遥远的地区进行维护，以及需要应对恶劣天气和复杂环境，风电箱变的维护成本通常较高。

为了克服以上偏远地区风力发电场箱式变电站供电运维困难的挑战，本文结合光伏发电的特点，利用低压直流的网架结构^[2]，提出了一种专为偏远环境设计的模块化智能箱变系统方案。这个方案不仅考虑了箱式变电站的拓扑结构设计，还详细阐述了控制、保护、接地设置以及通信等方面的设计思路。通过智能化的设计，这个系统能够更好地适应偏远环境下的运行需求，并提供可靠的供电运维解决方案。

在实际应用中，所提方案能够有效解决偏远地区风力发电场的供电运维难题。同时，它还能够与低压直流配电系统高效集成，确保整个系统的稳定运行。系统具备智能调节功率和动态需求响应等功能，大大提高了电力供应的效率和可靠性。此外，该方案还支持模块化设计和搭建，具有高度的灵活性和可自由拓展性，能够更好地适应不同场景下的需求，保障系统的安全可靠运行。同时，所提方案能够实现设备在线监测，降低偏远地区风电箱变的运维成本。

1 模块化智能箱变系统的结构

模块化智能箱变系统如图 1 所示，进线电力输入由 35kV 箱变的低压侧通过交流开关与中央双向变流器相连接，然后连接到直流母线。智能箱变的电源侧采用 35kV 干式变压器。随后，配备了一套混合双向逆变器，该逆变器可连接到光伏组件、储能电池、常规箱变用电负载以及柴油发电机，共 5 路可用。同时，储能模块可在非峰值充电段为系统补充电能，实现动态扩容。直流母线也可连接到一般的直流负载，如箱变用风扇、照明以及通讯供电等。其中的电

缆设置通常为两种常见的低压直流（LVDC）电缆配置，分别是 2 线（单极性）系统和 3 线（双极性）系统。IEC 60364-1 标识正极为 L+，负极为 L-，中点为 M^[3]。但是，关于直流电缆的标识和颜色编码仍然没有国际协议。在荷兰的实际工程中，低压直流电缆通常采用红色表示 L+，黑色表示 L-，蓝色表示 M 导体。为避免在现有的交流电缆用于直流时可能引起 DC 和 AC 之间的混淆，IET BS7671 已提供了有关 DC 电缆颜色的指南。当交流电缆用于直流时，LVDC 试验提出了不同的颜色选择。此外，光伏侧的直流输入电压为 350V。现有的低压直流的试验报告中，供应低压负载使用了三种不同的电压级别，包括 ±350V 和 ±30V 的可调电压范围、700V 和 ±60V 的电压范围，以及 ±700V 和 ±60V 的电压可调范围^[4]。

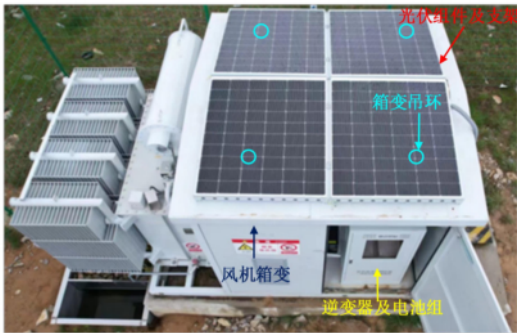


图 1 模块化智能箱变整体示意图

为保证箱变与光伏板之间的固定方式既不损坏箱变表面，又保持顶盖的防水防腐性能，本文提出了一种通过箱变吊环进行光伏组件固定的方案（见图 2）。该方案根据吊环安装角度的不确定性，利用原有吊环实现光伏组件的稳固安装。具体设计包括：部件（1）为光伏组件固定底座，部件（2）为可调节横梁，部件（3）为多角度吊环夹器。通过调节部件（2）的高度及部件（3）的角度，无需焊接等操作，即可实现光伏组件与箱变顶盖的无损连接，确保箱变外壳的防腐性和稳定性。

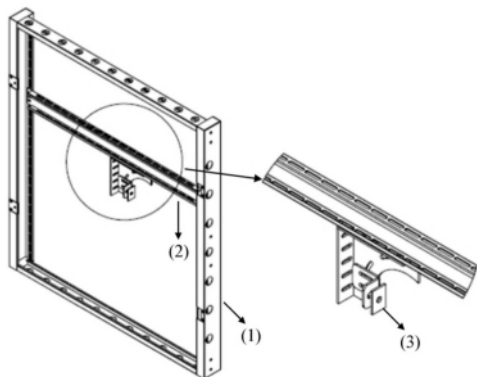


图2 模块化智能箱变光伏支架示意图

2 模块化智能箱变系统的控制

模块化智能箱变的控制主要借助智能边缘网关装置，如图3所示，该装置具备多项功能，包括对新能源发电的控制、并网控制、微网功率控制、系统监控以及配电保护等。它通过局部接入的方式将微网系统与交流配电系统连接起来。其核心任务在于实现新能源的本地即时使用，通过设备潮流控制和算法保护，以最大程度地利用清洁能源，提高新能源电能的使用效率，并在需要时提供后备电源，以此降低成本。

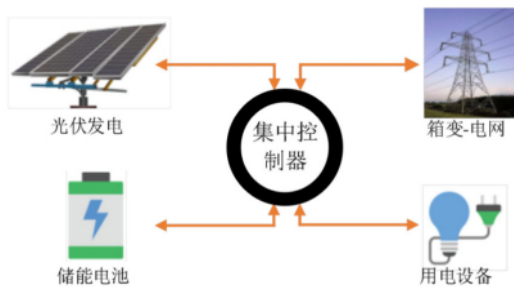


图3 模块化智能箱变控制示意图

其中，逆变器的控制框图如图4所示。逆变器通过锁相环（Phase Lock Loop, PLL）得到交流侧电压的相角。交流电压通过PLL和abc-dq变换进行解耦得到dq轴的电压，交流电流也通过相应的变换得到dq轴的电流。通过外环直流母线电压和无功功率的外环控制器产生新的dq轴的参考电流， i_{dref} 和 i_{qref} ，再通过内环电流控制器产生新的dq轴的参考电压 V_d' 和 V_q' ，通过锁相环产生的相角和dq-abc模块产生新

的交流参考电压，和三角载波进行脉宽调制产生开关的控制信号。

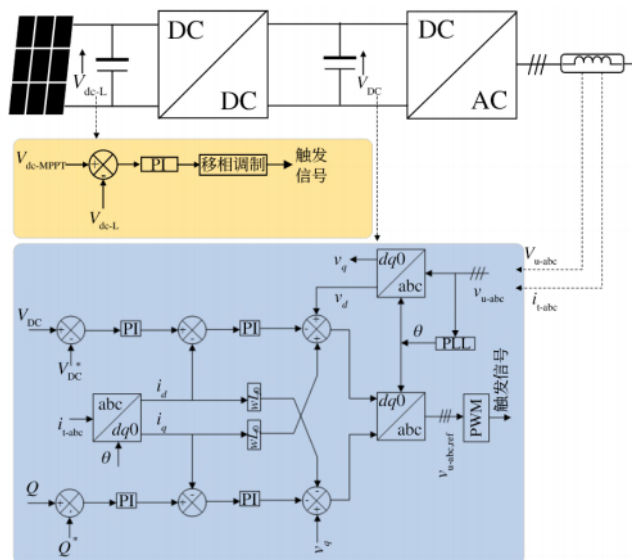


图4 逆变器控制框图

除了逆变器对直流侧和交流侧的控制，智能箱变还涉及对顶盖光伏和储能蓄电池之间的能量管理。其中，负载优先由太阳能供电，如果太阳能电力不足，负荷由电池供电。当电池电力不足时，负荷由电网供电。同时，如果太阳能充能，只有太阳能给电池充电。在没有太阳能的情况下，电网给电池充电。管理策略的电池状态（State of Charge, SOC）根据电池的端电压进行计算，例如，具体计算公式由厂家提供数据如图5所示，拟合得到如式（1）所示。端电压超过52V设置SOC为100%，端电压44V为0%。

$$SOC = 1.3154U^2 - 113.4466U + 2442.3 \quad (1)$$

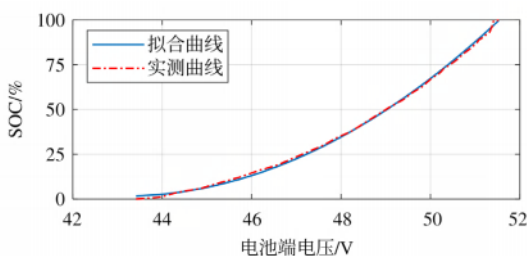


图5 电池SOC拟合曲线

具体的电池管理策略为当电池两端的端电压为 49V（对应 SOC 为 40%）时，电池停止对外放电，箱变的用电设备包括监测，通讯，以及控制由电网提供电能。当电池的电压为 51V（对应 SOC 为 78%）时，箱变的二次用电由电池提供。与此同时，光伏对电池进行充电，最大的充电电压为 56V，最小的放电电压为 44V，浮充电压设置为 54V。

3 模块化智能箱变的保护

针对低压交流侧的保护，模块化智能箱变通过监测交流侧的电压和频率实现对相应模块的隔离。针对电网电压的波动，当电网电压大于 225V 或者小于 215V 超过 10s 时，主动切断光伏和储能模块实现与箱变的隔离。同时，当箱变侧的频率大于 50.5Hz 或者小于 49.5Hz 超过 10s 时，集中控制器也下达切断指令实现光伏和储能与箱变的隔离。

针对直流侧，由于智能箱变采用低压直流的架构^[5]，将引入新形式的故障特性，这将从根本上改变低压保护的要求。电力电子变流器对由短路引起的直流电压急剧下降非常敏感，这可能会导致变流器失去控制，并更有可能在下游保护之前跳闸，导致保护选择性不达标和不必要的跳闸。现有的保护方案有基于电压变化率和电流变化率的保护方案^[6]，以电流变化率为例，其表达式如式（2）所示，其中， U_0 为逆变器滤波电容的额定电压， R ， L ， C 为故障回路对应的电阻，电感和电容。可以发现当故障发生时（ $t=0$ ），电流的变化率和电容两端的电压以及故障回路的电感有关。相应的保护方案通过数理关系建立，即：

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U_0}{L \cdot (s_1 - s_2)} \cdot (s_1 \cdot e^{s_1 t} - s_2 \cdot e^{s_2 t}) \quad (2)$$

$$\begin{cases} s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \\ \alpha = \frac{R}{2L} \\ \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \end{cases} \quad (3)$$

能够在故障发生的瞬间通过故障回路的数理特性实现故障的快速判断和区分。为了确保故障保护方法的有效实施，电流的采集对于保护方案的运行也是相当关键。快速和准确的数据采集能够保证保护方案能够有效地产生保护触发信号。除此之外，故障的切除需要有高效可靠的故障开断装置。现有的故障隔离装置有直流熔断器、直流塑壳断路器、固态断路器和混合型断路器^[7]。通常在直流系统中，直流故障需要在几毫秒开断，传统的熔断器无法满足直流故障的开断要求。适用于直流系统的熔断器在市面上已经有商业化的产品，例如 ABB E90 系列用于 1500V 直流光伏设备。

4 模块化智能箱变的接地设置

与交流系统部分类似，IEC60364-1 确定了五种不同类型的直流系统接地配置，包括 TN-S（电源侧中性点接地，接地保护线和工作零线分开）、TN-C（电源侧中性点接地，工作零线兼做接地保护线）、TN-C-S（电源侧中性点接地，部分工作零线兼做接地保护线）、TT（电源侧中性点接地，电气设备金属外壳接地）和 IT（电源侧没有工作接地，负载侧进行接地保护）。对于工作电压小于 400V 的低压直流系统，可以使用 TN 接地。当低压直流网络以 TN 方式接地时，考虑到与直流保护地（PE）连接的任何金属表面的防腐也是重要的。为了满足这一要求，可以使用二极管或通过电容接地将 LVDC 系统接地，或者通过使用与电容器并联的二极管。

5 模块化智能箱变的通讯设置

在模块化智能箱变中，模块本身具备多种接口，如串口、RS232、RS485、4G、数字输入输出、RJ45等，用于实现设备之间的通信^[8]。对模块化智能箱变的控制需要覆盖 kHz 到几分钟的时间范围。这要求使用不同的控制频率，并考虑每个控制环路的响应时间以及所需的通信速度。对模块化智能箱变的控制需要覆盖 kHz 到几分钟的时间范围。这要求使用不同的控制频率，并考虑每个控制环路的响应时间以及所需的通信速度。在集中式实施这种控制系统会面临通信丢失的挑战（可能是完全丧失通信或丢失多个数据包）。因此，控制系统的实施应该通过在本地层（电站级别）实现的控制器进行，而其他功能则由智能网关控制单元实现，该单元与电网中的其他监测设备和变电站交换信息。这个通信框架在图 6 中有所体现，其中显示了智能箱变控制的潜在通信流程。所提的模块化智能箱变的通讯根据不同模块的通讯要求配置不同的通讯模式以实现箱变内部的各种功能。

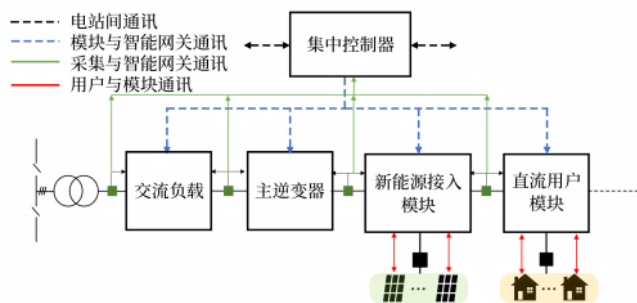


图 6 模块化智能箱变的通讯示意图

6 结束语

低压直流配电技术在分布式发电领域展现出巨大潜力，能够充分发挥分布式低碳技术的优势。针对偏远地区风电箱变运维困难的问题，本文提出了一种基于低压直流配电技术的模块化智能箱变系统方案，涵盖拓扑结构、控制、保护、接地及通信等设计。该系

统利用新能源优势，降低能量损耗并提升效率，具备安全可靠、灵活扩展的特点，支持智能功率调节和在线监测，能有效降低运维成本并确保稳定运行。

参考文献

- [1] 李雨桐，郝斌，赵宇明，等. 低压直流配电技术在净零能耗建筑中的应用探索 [J]. 广东电力，2020，33（12）：49-55.
- [2] 吴兴奇，孙凯祺，姜杰，等. 低碳“光储直柔”系统拓扑选型研究 [J]. 供用电，2022，39（8）：21-29.
- [3] IEC60364-1：2005 Low-voltage electrical installations [S].
- [4] A. Makkieh, et al. DC Networks on the distribution level-New trend or Vision [C]. in CIRED 2021, 2021.
- [5] 曾嵘，赵宇明，赵彪，等. 直流配电用电关键技术研究与应用展望 [J]. 中国电机工程学报，2018，38（23）：6791-6801，7114.
- [6] ZHAO Shukang, SUN Yuanyuan, MA Zhao, et al. Energy Coordination Control Strategy for Low Voltage Direct Current Supply and Utilization System with Multiple Operating Modes[J]. Power System Technology, 2024，48（8）：3483-3492.
- [7] 郑超文，吴浩. 柔性直流配电网保护策略综述 [J]. 四川电力技术，2024，47（4）：65-70.
- [8] 夏尚学，祝万，任祖怡. 源网荷储控制系统中储能控制策略的研究和应用 [J]. 湖北电力，2023，47（5）：94-100.

（收稿日期：2024-09-28）