

基于光储箱变直流系统的 快速故障保护研究

何欢¹ 王万银¹ 赵顺¹ 刘书晗¹ 王天阔² 毛江峰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：光伏发电已经成为一种普遍的新能源发电方式，尤其在日益电气化的交通和供热领域。为了解决现有偏远地区箱变供电运维困难的问题，利用低压直流构建光储箱变成为工业界“光储直柔”的一个发展热点。然而，直流故障保护的稳定性和可靠性是限制光储箱变大力发展的一个主要障碍。直流故障对保护算法的快速性、区分性以及可靠性提出了更高的要求。针对光储箱变直流系统本文提出了基于电流变化率的快速保护方法，利用电流变化率实现直流系统的快速方向保护，所提方案不需要设置保护的阈值，从而克服了现有保护方案阈值选择困难以及保护选择性不足的局限性。同时，通过在 PSCAD/EMTDC 中建立的光储箱变直流系统进行故障场景的测试，以评估所提方案的可靠性和故障隔离能力。

关键词：光储箱变；低压直流；直流保护；直流控制

0 引言

分布式低碳技术（Low Carbon Technologies, LCTs），如电动汽车（Electric Vehicle, EV）、热泵（Heat pump）、光伏发电（PV）和电能储存，将对现有的低压（LV）电网的基础设施和运营施加巨大压力^[1]。这可能会导致中压/低压（MV/LV）变压器和低压电缆过载。采用传统的方法来解决上述低压配电网的问题和挑战（例如，建设新的分站和增加新的电缆）既昂贵又不是十分有效。低压直流（LVDC）配电系统具有潜力，可以提高低压电缆的功率传输能力并减少相关的热损失^[2]。这种潜力的实现得益于电力电子成本的降低^[3]（过去二十年持

续下降 5%）以及直流保护技术的不断成熟。低压直流系统与交流电网之间的交直流接口有潜力提供传统变压器无法提供新的控制功能，包括更有效的电压控制、双向功率流控制、独立的无功和有功控制，以及故障管理能力。

目前，虽然低压直流（LVDC）作为光储箱变配电方案在技术上具有潜力，但尚未有任何一家公共事业单位将其作为业务的标准做法。这种情况主要是由于 LVDC 技术在大规模应用中的复杂性和挑战性。然而，全球范围内已经存在许多低压直流系统的试点项目，并且有大量的国际标准正在制定过程中。这些试点项目和标准化工作作为 LVDC 技术的未来发展提供了

宝贵的经验和数据支持^[4]。这些经验对于推进 LVDC 技术的下一步发展至关重要，有助于识别和解决在更大规模应用中可能遇到的技术问题和挑战。与此同时，为了更广泛地推广 LVDC 技术，国际电工委员会（IEC）最近制定了相关的技术指导和标准，这对推动 LVDC 技术的应用起到关键作用^[5]。尽管如此，最近的 IEC LVDC 技术报告一致指出，LVDC 技术面临的关键挑战之一是需要开发出可靠的直流保护解决方案。

一般来说，LVDC（低压直流）保护方案的设计和性能在很大程度上受到主电网与 LVDC 接口的影响。这种接口对于整个系统的稳定性和可靠性至关重要，其中两电平电压源换流器（VSC）因其设计简单、成本低廉而被广泛应用于将 LVDC 系统连接到交流电网。然而，虽然 VSC 具有成本效益，但其在故障情况下的表现存在显著局限性。由于 VSC 本身不具备主动故障控制能力，当系统中发生故障时，可能会出现超额的故障电流和快速的电流变化率（ dI/dt ）^[6]。快速变化的直流故障电流不仅要求使用额定更高的设备来承受可能的电气应力，还需要非常快速的保护机制来检测和隔离故障，以防止设备损坏。

传统的保护解决方案，例如过电流保护，通常依赖于两电平 VSC 显著的故障电流贡献。然而，当系统中的故障电阻增加时，过流保护的响应速度可能会显著降低，无法快速准确地判断故障状态。这种延迟会导致系统长时间处于故障状态，增加逆变器等设备的热应力，进而可能引发设备过热甚至电气设备灾害。此外，随着故障状态持续，可能会对整个电力系统的稳定性产生负面影响，进一步增加电气设备损坏的风险^[7]。因此，为了保障系统的安全性和可靠性，有必要开发能够应对快速电流变化并提供精确故障检测的高级保护方案，以替代传统的过流保护。

因此，本文提出了一种基于光储箱变直流系统的

快速故障保护方法，利用电流变化率的方向特性构建保护方案。第一部分概述了光储箱变直流系统的故障特性以及主要保护挑战。第二部分详细解释了所提出的基于电流变化率的光储箱变快速保护方案。第三部分展示了用于测试该方案在直流母线故障时性能的仿真研究。最后，第四部分给出了本文的结论。

1 低压直流光储箱变系统的故障特性

所提低压直流光储箱变系统的系统拓扑如图 1 所示。主要由主输电线路（交流母线和直流母线）、交流变压器、光伏发电、储能和负载所组成。

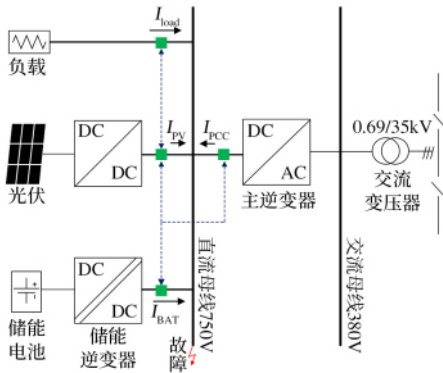


图 1 光储箱变系统简化模型

当直流侧发生故障时，以主逆变器为例，故障回路可以简化为 RLC 等效电路，如图 2 所示。在直流极对极故障下，直流故障可分为三个阶段^[8]，电流路径如图 2 所示。

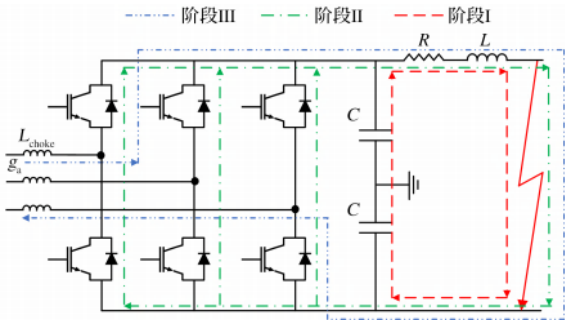


图 2 简化的两电平电压源换流器的故障电流路径

阶段 I：电容放电。两电平电压源换流器的滤波电容将放电，并提供高瞬态电流。

阶段 II：二极管续流。在电容完全放电后，反并联二极管将正向导通，二极管在三个阶段中承受最高的故障电流，是逆变器最危险的阶段。

阶段 III：电源供电（如交流电网、光伏、电池）。在二极管续流之后，电源提供故障电流^[9]。

本文着重分析阶段 I 的故障特性。当发生极对极短路故障时，形成了电阻-电感-电容（RLC）电路，该电路由最初存储在电容和电感中的能量激发。电容两端的初始电压为 U_0 ，通过电感的初始电流为 I_0 。应用基尔霍夫电压定律（KVL）理论，可以得知故障回路的电流与电压之间关系的式（3）和式（4）：

$$U_c(0) = U_0 \quad (1)$$

$$I_L(0) = I_0 \quad (2)$$

$$L \cdot \frac{dI}{dt} + R \cdot I - U_c = 0 \quad (3)$$

$$L \cdot \frac{dI}{dt} + R \cdot I + \frac{1}{C} \cdot \int I \cdot dt = 0 \quad (4)$$

对式（4）的左右两边进行求导，得到式（5）。可以发现，式（5）是一个描述直流系统在短路故障条件下阶段 I 电流响应的二阶微分方程。通常，式（5）的完整解如式（6）所示，常数 A_1 和 A_2 取决于初始条件， s_1 和 s_2 是特征方程的根，如式（7）所示。在式（7）中， α 是奈奎斯特频率，如式（8）所示。术语 ω_0 被定义为共振频率，如式（9）所示。具体如下：

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{1}{LC} = 0 \quad (5)$$

$$I(t) = A_1 \cdot e^{s_1 t} + A_2 \cdot e^{s_2 t} \quad (6)$$

$$s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (8)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (9)$$

在式（7）中，阻尼因子和共振频率的不同参数会影响直流故障响应，其中 $\alpha > \omega_0$ 、 $\alpha = \omega_0$ 和 $\alpha < \omega_0$ 分别表示过阻尼、临界阻尼和欠阻尼。在欠阻尼条件下，式（6）的根是复数。应用欧拉方程到式（6），可以导出欠阻尼电流响应，如式（10）所示，其中 ω_d 是阻尼共振频率，定义如式（11）^[8]：

$$I_{\text{stage I-un}}(t) = \frac{U_0}{L \cdot \omega_d} \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega_d \cdot t) \quad (10)$$

$$+ I_0 \cdot e^{-\alpha t} \left[\cos(\omega_d \cdot t) - \frac{\alpha}{\omega_d} \sin(\omega_d \cdot t) \right]$$

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \quad (11)$$

此外，对于过阻尼条件，可以导出通用方程，如式（12）所示：

$$I_{\text{stage I-ov}}(t) = \frac{U_0}{L \cdot (s_1 - s_2)} \cdot (e^{s_1 t} - e^{s_2 t}) \quad (12)$$

$$+ \frac{I_0}{s_1 - s_2} \left[\left(s_1 + \frac{R}{L} \right) \cdot e^{s_2 t} - \left(s_2 + \frac{R}{L} \right) \cdot e^{s_1 t} \right]$$

以欠阻尼条件为例。当初始电流 I_0 相对较小时，可以忽略式（10）的第二部分，从而简化为式（13）。对式（13）的两边进行求导，故障电流的变化率 dI/dt 为式（14）所示。当故障发生时，即 $t=0$ ，电流变化率的表达式可以简化为式（15），可以发现电流的变化率和电压以及线路的电感有关。

$$I_{\text{stage I-un}}(t) \approx \frac{U_0}{L \cdot \omega_d} \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega_d \cdot t) \quad (13)$$

$$\frac{dI}{dt}_{\text{un}} = \frac{U_0 \cdot e^{-\alpha t}}{L} \cdot \left[\cos(\omega_d \cdot t) - \frac{\alpha}{\omega_d} \cdot \sin(\omega_d \cdot t) \right] \quad (14)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U_0}{L} \quad (15)$$

根据式（15），可以发现直流故障发生时，电流的变化率为正向。这种特性有别于传统的电流幅值的变化，直流系统的电流的正负取决于正常工况下的

负载电流。本文基于直流电流变化率的特性，提出了基于光储箱变直流系统的快速保护方法。

2 基于电流变化率的光储箱变系统快速保护方案

在正常运行中，控制继电器（CRs）持续监测母线电压（ U ）和电流（ I_{PV} , I_{load} , I_{Bat} , I_{PCC} ）信号。同时，智能继电器计算电流的变化率（ dI_{PV}/dt , dI_{load}/dt , dI_{Bat}/dt , dI_{PCC}/dt ）。当被监测的电压低于额定电压的 90%，则认为光储箱变低压直流系统处于故障状态，如图 3 所示。目前，尚无关于公共低压直流配电网络电压波动的全球规定。因此，选择 90% 这一标准是基于其他低压直流应用中的现有标准，例如 IEC60092-101 和 IEEE 标准 1709—2018，这些标准主要用于船舶应用中的直流系统，IEC63282 规定电压在 $\pm 10\%$ 以内。

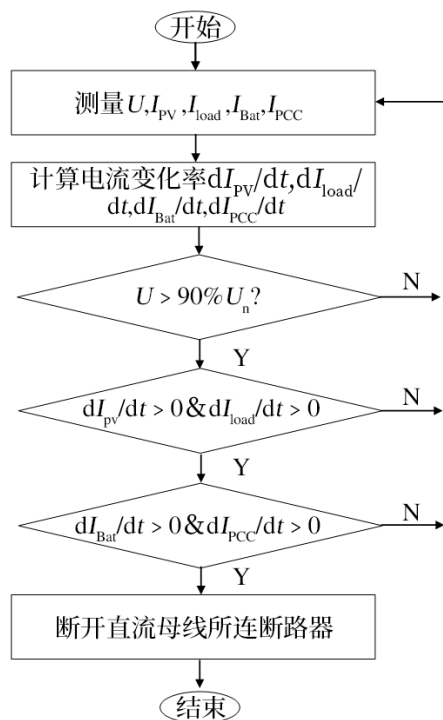


图 3 基于电流变化率的光储箱变快速保护方案流程图

然后，根据式（15），可以确定故障发生在所测电流支路的下游。当各支路的计算电流变化率均大于 0 时，结果显示为正号，表明故障位置可能位于直流母线的下游区域。在这种情况下，系统会判断直流母线处存在故障，并由智能继电器向相应的断路器发送断开指令，快速切断故障保障系统的安全运行。

如果计算出的电流变化率不满足大于 0 的条件，或者部分支路电流变化率为负，系统则不会立即采取断开操作，而是继续实时监测直流母线电压和各个支路的电流变化，进一步确定故障性质和具体位置。这种基于综合判断的保护机制，不仅能够避免误动带来的负面影响，还能最大限度地保障电网的可靠性。

3 仿真建模与分析

光储箱变直流系统的模型如图 1 所示。该系统包含交流/直流转换器。在公共连接点（PCC），提供 0.75kV 的极对极直流电压。电缆由等效的 $R-L$ 电路表示（即 $0.164\Omega/\text{km}$ 和 $0.24\text{mH}/\text{km}$ ）^[10]，每条馈线长度为 5m。直流终端用户的总功率为 20kW。

当直流母线故障发生在 0.5s 时，系统电压的特性如图 4 所示，直流母线的电压急剧下降，低于故障保护的阈值，主线路的电流急剧上升如图 5 所示。与此同时，保护继电器计算光伏（ I_{PV} ），负载（ I_{load} ），储能电池（ I_{Bat} ），以及主线路（ I_{PCC} ）电流的变化率，如图 6 所示。电流变化率都具备正向幅值。根据图 3 中的保护判据，满足保护动作条件，继电器发送信号断开母线所连断路器，故障被隔离，故障电流降为 0kA，如图 5 所示，主逆变器电压恢复正常如图 4 所示。可以发现，所提保护方法能够在 0.1ms 内快速隔离故障，确保光储箱变系统的可靠、稳定、安全运行。

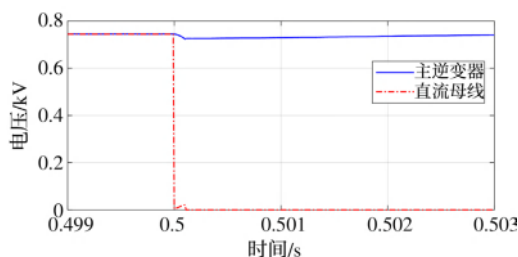


图4 直流母线故障时电压特性

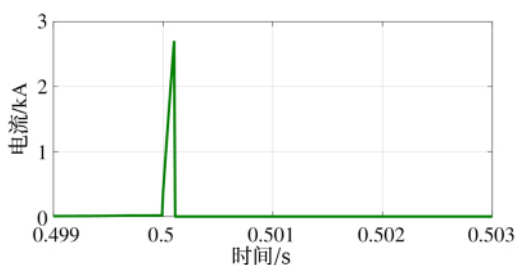


图5 直流母线故障时电流特性

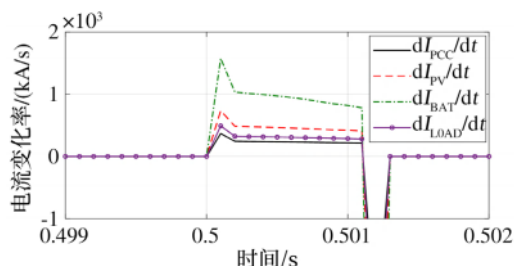


图6 直流母线故障时电流变化率特性

4 结束语

本文针对光储箱变直流系统，提出基于电流变化率的快速保护方法，利用电流变化率实现快速保护，无需设置保护阈值，克服了传统保护方案中阈值选择难和选择性不足的局限。通过在PSCAD/EMTDC中的故障场景测试，直流母线故障能够在0.1ms内被快速隔离，确保系统的稳定运行。

参考文献

- [1] 李建标, 陈建福, 陈夏, 等. 低压直流供用电技术在零碳建筑中的探索应用[J]. 供用电, 2022, 39(8): 67-74.
- [2] 姜瀚瀚, 彭克, 徐丙垠, 等. 直流配电系统示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 219-231.
- [3] 曾嵘, 赵宇明, 赵彪, 等. 直流配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.
- [4] 李叶茂, 李雨桐, 郝斌, 等. 低碳发展背景下的建筑“光储直柔”配用电系统关键技术分析[J]. 供用电, 2021, 38(1): 32-38.
- [5] 李雨桐, 郝斌, 赵宇明, 等. 低压直流配用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.
- [6] 李永刚, 韩冰. 低压直流配电系统保护研究综述[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2020, 47(1): 17-23, 41.
- [7] 霍竞冲, 孟润泉, 李胜文, 等. 低压直流配电系统极间短路故障分析与保护[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(5): 1-10, 19.
- [8] 吴晓夏, 童亦斌, 丁庆, 等. 低压直流系统短路故障特性研究[J]. 供用电, 2021, 38(10): 80-88, 115.
- [9] 杨亚宇, 邵能灵, 黄文焘, 等. 船舶中压直流综合电力系统(二): 故障保护管理技术[J]. 电工技术学报, 2024, 39(23): 7341-7364.
- [10] Emhemed Abdullah A. S., Fong Kenny, Fletcher Steven, et al. Validation of Fast and Selective Protection Scheme for an LVDC Distribution Network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1432-1440.

(收稿日期: 2024-09-20)