文章编号：1674-0629(2026)09-0157-18 中图分类号：TM42；TM73 文献标志码：A
DOI：10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2026.09.014

计及故障综合限流控制的双极直流配电网保护方案

董亮辉[1]，侯星宇[2]，赖锦木[3]，王要强[1]，尹项根[4]
（1. 郑州大学电气与信息工程学院，郑州 450001；2. 国网河南省电力公司鹤壁供电公司，河南 鹤壁 458031；3. 武汉理工大学新能源与电气工程学院，武汉 430070；4. 华中科技大学电气与电子工程学院，武汉 430074）

摘要：双极低压直流配电网具备可再生能源集成、供电方式灵活和供电可靠性高等优点，但其短路故障会造成系统严重过流，威胁系统的正常运行。针对单极接地和双极短路故障提出了一种基于双极型隔离式模块化多电平直流变压器的故障综合限流控制策略，通过软、硬件结合的方式有效抑制变压器内部过电流及输出故障电流，从而降低直流断路器的切断时间及容量需求。分析了不同故障下双极低压直流配电网的电流故障分量，提出了基于电流积分平均值的故障识别判据，结合闭锁原件和延时元件构建了双极低压直流配电网保护方案。仿真验证了故障综合限流控制策略及保护方案的正确性和有效性。

关键词：双极低压直流配电网；双极型隔离式模块化多电平直流变压器；故障综合限流控制策略；故障特性；保护方案

Protection Scheme for Bipolar DC Distribution Network Considering Fault Comprehensive Current Limiting Control

DONG Lianghui[1], HOU Xingyu[2], LAI Jinmu[3], WANG Yaoqiang[1], YIN Xianggen[4]
（1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. State Grid Henan Electric Power Company Hebi Power Supply Company, Hebi, Henan 458031, China; 3. School of New Energy and Eletrical Engineering , Wuhan University of Technology, Wuhan 430070 China; 4. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China）

Abstract: Bipolar low-voltage DC distribution networks have the advantages of renewable energy integration, flexible power supply mode and high-power supply reliability, but their short-circuit faults have a serious impact on power supply reliability. In this paper, a fault comprehensive current limiting control strategy based on a bipolar isolated modular multilevel DC transformer is proposed for unipolar grounding and bipolar short-circuit faults in bipolar low-voltage DC distribution networks, which effectively suppresses the internal overcurrent of the transformer and the output fault current by means of combining software and hardware, so as to effectively reduce the cut-off time and the capacity requirement of the DC circuit breaker. The current fault components of bipolar low-voltage DC distribution networks under different faults are analyzed, and a fault identification criterion based on the average value of the current integral is proposed, and a protection scheme for bipolar low-voltage DC distribution networks is constructed by combining with directional elements and time-delay elements. Simulation verifies the correctness and effectiveness of the comprehensive fault current limiting control strategy and protection scheme.

Key words: bipolar low-voltage DC distribution networks; bipolar isolated modular multilevel DC transformer; fault comprehensive current limiting control strategy; fault characteristic; protection scheme

基金项目：国家自然科学基金资助项目(52337006,52307148)。
Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52337006,52307148).

0 引言

近年来，随着新能源与新型电力系统的不断发展，中低压直流配电网成为电气领域的研究热点之一[1-3]。直流配电网结构主要分为单极接线结构和双极接线结构[4]。单极接线结构是双回线路结构，包括正极直流线路和负极直流线路，结构简单，易于控制，但只能提供单一的直流电压等级；而双极接线结构是三回线路结构，包括正极直流线路、负极直流线路和中性线路，可以提供两种电压等级。与单极接线结构相比，双极接线结构无论在中压直流(medium voltage direct current，MVDC)输电网还是低压直流(low voltage direct current，LVDC)配电网中均具有更高的供电可靠性和更多的选择性[5]。

直流配电网中的电力电子变流器包括电压源换流器(voltage source converter，VSC)和直流变压器(direct current transformer，DCT)[6]。其中DCT是MVDC和LVDC之间的关键设备，而隔离式模块化多电平直流变压器(isolated modular multilevel DC transformer，IMMDCT)在中压大功率场合得到了广泛的关注和研究，以实现不同电压等级直流输电系统的连接[7]。对于双极接线结构的中低压直流电网，需要采用双极型IMMDCT(bipolar IMMDCT，BIMMDCT)，以在结构上实现双极传输功率解耦。

然而，目前对于双极直流配电网的故障限流及保护方案的研究尚显薄弱。LVDC配电网呈现低阻尼特性，当发生短路故障时会造成极大的冲击电流导致换流器闭锁，从而引发大范围停电。此外，换流器的重启和恢复时间较长，会对电力系统造成严重影响[8-11]。为了提高供电可靠性，需要在电流达到换流器闭锁前切除故障或有效抑制故障电流，延长换流器的运行时间[12-14]。在LVDC配电网故障隔离方面，可以考虑结合故障限流技术的直流断路器(DC circuit breaker，DCCB)故障隔离方案，以此来降低直流断路器的成本及制造难度[15-16]。

在LVDC配电网中，故障限流技术已有较多研究，文献[17]通过在线路上安装限流电抗器来抑制短路故障电流，虽然在一定程度上能限制短路电流，但会增加设备成本，并可能影响系统的稳态运行。文献[18]通过在直流侧设置附加虚拟阻抗的控制环节，可在直流侧发生故障时来等效增加电感进行限流。文献[19]通过切除支撑电容及相应的主动电流控制方法来抑制故障电流，但其主动电流控制需闭锁双有源桥的副边H桥，对系统的故障恢复会造成一定影响。文献[20]通过切除LVDC侧端口电容、投入高频变压器副边电感、增加开关管频率及内移相比来抑制故障电流，但操作复杂且会额外增加设备成本。在基于直流断路器的故障隔离方面，文献[21]提出了一种基于故障方向比较的新型先导保护方案，通过比较短路电流故障分量的正负半波积分值来判断故障方向，从而区分内部故障和外部故障。文献[22]在电力电子变压器故障穿越的基础上，采用傅里叶变换提取故障电流高频分量来构造保护判据，进而构建了一种单端量保护方案。文献[23]采用了多采样差分保护方法来提高保护的稳定性，避免了由于时间同步误差导致的误动作。文献[24]提出了一种基于通信辅助的过流保护方案，响应速度快，适用性广，但对通信网络的可靠性有较高要求。

本文围绕限制故障电流展开，针对双极LVDC配电网发生故障时，通过控制BIMMDCT来主动限制其输出的故障电流及内部过电流，防止BIMMDCT因过流闭锁导致大范围停电，同时能够降低直流断路器的切断容量需求。由于双极LVDC配电网馈线短且分支多，通过在故障限流的基础上，将DCT本身的拓扑特点和相应的控制与保护配置相结合来完成双极LVDC配电网保护。

本文提出了一种基于软、硬件相结合的故障综合限流控制(fault comprehensive current limit control，FCCLC)策略，用于主动控制BIMMDCT的故障电流及内部过电流，可有效降低直流断路器的切断容量需求。并分析了不同故障下双极LVDC配电网的电流故障分量，提出基于电流积分平均值的故障识别判据，构建了双极LVDC配电网保护方案。

1 双极LVDC配电网架构

1.1 双极LVDC配电网典型架构

双极直流配电系统典型架构如图1所示，可再生能源(以光伏、风能为例)、储能、负荷通过DC-DC变换器灵活接入正极(p)、中性线(g)、负极(n)3条直流母线构成双极直流配电系统。该架构特别适用于以下典型场景。

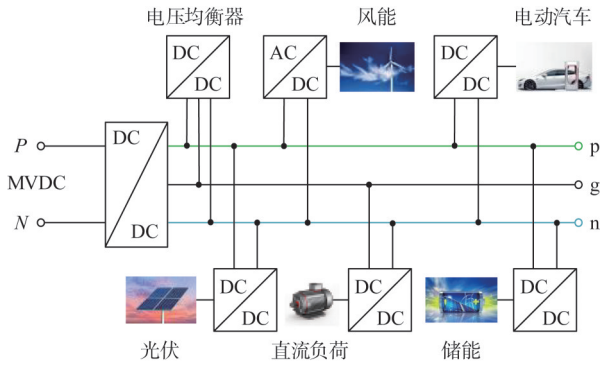


图 1　双极 LVDC 配电网的典型架构

Fig. 1　Typical architecture of a bipolar LVDC distribution network

1)可再生能源高渗透接入区域，如风光储一体化微电网，其中双极结构可实现对不同电压等级负荷的灵活供电，并提高系统故障穿越能力；

2)城市数据中心供电系统，双极 LVDC 可提供 ±750 V 等多电压等级，满足服务器、储能、空调等多类负荷需求，提升供电可靠性；

3)工业园区柔性配电网，双极结构便于实现分区供电与故障隔离，避免单极故障导致全线停电；

4)舰船综合电力系统，双极直流配电可简化系统结构，提高功率密度和供电品质。

综上，双极 LVDC 配电网在提升系统可靠性、兼容多类型电源与负荷方面具有显著优势，是未来低压配电系统的重要发展方向。

1.2　双极型 IMMDCT 拓扑与控制

由于正负极之间电源与负荷的分布不平衡会导致正负极母线产生电压差，双极系统需要配置电压均衡器用于均衡正负极电压，来保证正负极之间的功率平衡。而本文在 DC-DC 变换中所采用的 BIMMDCT，不仅能使低压侧实现双极接线结构，中压侧也能实现双极接线结构，无需配备电压均衡器，规避了其带来的系统复杂度和损耗增加等问题。

BIMMDCT 拓扑结构如图 2 所示，中压侧由两个 MMC 串联组成，形成双极 MVDC 端口，其中 V_{MVp} 和 V_{MVn} 分别表示中压侧正极母线电压和负极母线电压[25]。低压侧由 4 个 H 桥交错并联形成双极 LVDC 端口，其中 V_{LVp} 和 V_{LVn} 分别表示低压侧正极母线电压和负极母线电压。MMC 通过两个并联的中频变压器(MFT)连接到 H 桥，传输到每个 H 桥的功率通过不同 MFT 的漏电感和传输电感分别传输，从而实现功率解耦。MMC 由 4 个桥臂组成，每个桥臂由 N 个子模块(SM)组成。同时，桥臂中 SM 的数量 N 取决于 MVDC 电网的电压水平和 SM 电容的额定电压。每个 MMC 桥臂上都有一个耦合电感，上桥臂和下桥臂上的电感相互耦合。耦合电感用于平衡上下桥臂电流的交流分量，过滤和限制桥臂中的电流波动，抑制故障电流的上升率。其中低压侧的 4 个 H 桥中，第一和第三 H 桥并联接入 LVDC 的正极端口，第二和第四 H 桥并联接入 LVDC 的负极端口。

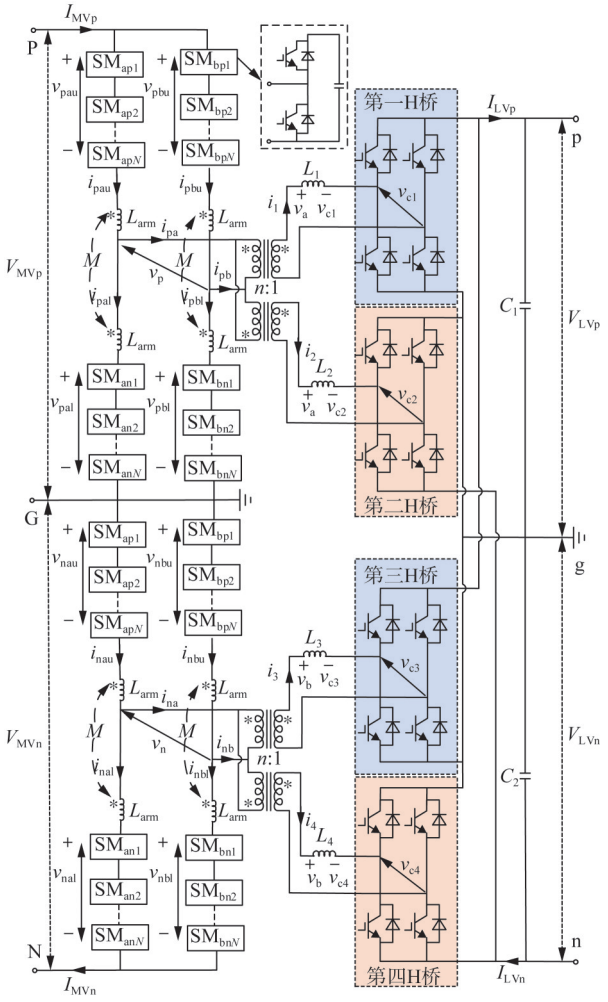


图 2　双极型隔离式模块化多电平直流变压器拓扑图

Fig. 2　Topology of bipolar isolated modular multilevel DC transformer

系统中性线(g)通常通过高阻或直接接地，形成明确的接地点。接地点位置直接影响单极接地故障时的短路电流路径：若中性点接地，故障电流将通过接地路径形成回路，增大短路电流幅值，同时

对系统绝缘配合提出更高要求，需确保正负极对地绝缘强度满足额定电压及过电压耐受能力。本文假设系统采用中性点直接接地方式，以简化故障分析，实际工程中可根据系统容量与保护策略选择合适的接地方式。

BIMMDCT的系统级控制策略框图如图3所示。在低压侧的双极直流电压控制中，主要有两个反馈控制电路，即低压侧正极电压反馈控制回路和低压侧负极电压反馈控制回路。正、负极电压反馈控制回路测量正极电压V_{LVp}和负极电压V_{LVn}，并分别与正、负极电压参考值$V_{\mathrm{LVp,ref}}$和$V_{\mathrm{LVn,ref}}$进行比较，通过PI控制器调整两个相移角φ_1和φ_2，从而消除双极电压控制误差。低压侧正、负双极反馈控制和中压侧子模块电容电压平衡控制共同组成了BIMMDCT的控制策略，保证BIMMDCT的正常运行。其中中压侧子模块电容电压平衡控制采用了单排序算法，具体如下。

1)在每个控制周期中采集各个桥臂子模块电容电压的数值；

2)根据1)中各个桥臂子模块的电容电压，计算各电容在一个周期内的总电荷增量，并进行排序；

3)根据2)中的排序结果分配触发信号，小的分配移相比大(相位滞后)的驱动信号，大的分配移相比小(相位超前)的驱动信号。

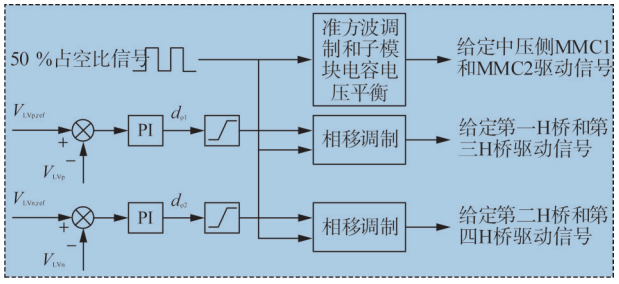


图3 BIMMDCT系统级控制策略框图

Fig. 3 Block diagram of BIMMDCT system level control strategy

BIMMDCT正常运行时功率传输如图4所示，低压侧正极负荷所需功率P_{LVp}由中压侧正极通过第一H桥传递的功率P_{LVp1}和中压侧负极通过第三H桥传递的功率P_{LVp2}共同提供，即有$P_{\mathrm{LVp}}=P_{\mathrm{LVp1}}+P_{\mathrm{LVp2}}$，同理低压侧负极负荷所需功率$P_{\mathrm{LVn}}$由中压侧正极通过第二H桥传递的功率$P_{\mathrm{LVn1}}$和中压侧负极通过第四H桥传递的功率$P_{\mathrm{LVn2}}$共同提供，即有$P_{\mathrm{LVn}}=P_{\mathrm{LVn1}}+P_{\mathrm{LVn2}}$。

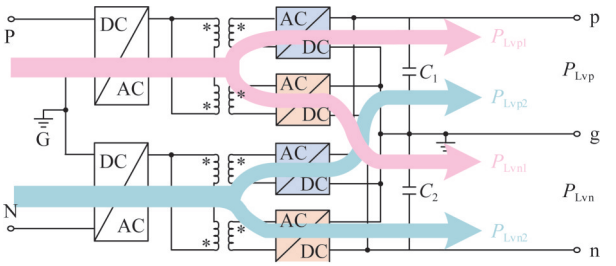


图4 BIMMDCT正常运行时功率传输

Fig. 4 BIMMDCT power transfer during normal operation

2 双极LVDC配电网故障综合限流控制策略

2.1 BIMMDCT拓扑改进

图5显示了在BIMMDCT拓扑的基础上改进的拓扑。通过在LVDC正负极端口处的电容上加装双向开关，实现在发生故障时可以将电容从电路中切除，防止电容在故障回路放电造成故障过电流。除了拓扑改进，再配以相应的主动限流控制，能够有效降低LVDC端口正、负极母线发生短路时的故障峰值电流及稳态电流。

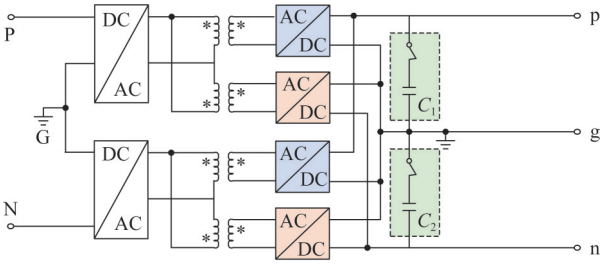


图5 BIMMDCT拓扑改进图

Fig. 5 Diagram of BIMMDCT topology improvement

2.2 故障综合限流控制策略

在LVDC端口正、负极母线发生短路故障时，故障电流主要由LVDC端口的正、负极电容放电及MVDC侧向LVDC侧传输的功率组成。因此，除了在故障时将LVDC端口电容切除，还有必要限制MVDC侧向LVDC侧传输的功率。以LVDC正极母线发生短路故障为例，此时检测到故障后切除LVDC正极端口电容，故障电流由MVDC侧提供，两个MMC经过中频变压器分别向LVDC的正极和负极传输功率。由于第一H桥和第三H桥并联接入LVDC的正极端口，因此只要在第一H桥和第三H桥增加内移相θ，就可以通过控制θ的大小来控制MVDC侧向LVDC侧传输的功率，该内移相θ与π

之比定义为 d_θ（$0 \leqslant d_\theta \leqslant 1$）。为了使故障电流尽可能的小，使 d_θ=1，如图 6 所示，其中 S1 和 S4 分别为 H 桥内部的第一个和第 4 个开关管的驱动信号，有：

$$v_{c1} = v_{c3} = 0 \tag{1}$$

式中 v_{c1}、v_{c3} 分别为第一 H 桥和第三 H 桥的交流电压。

理论上，从 MVDC 侧传输到 LVDC 侧的功率可以减少到 0。

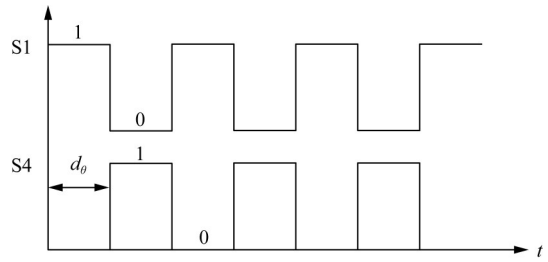


图 6　BIMMDCT 主动限流原理

Fig. 6　BIMMDCT active current limiting principle

LVDC 侧负极母线短路故障和双极短路故障与正极母线短路故障分析类似，此处不再赘述。

由于 BIMMDCT 采用的是定电压控制，所以在短路故障期间定电压控制不再有效，且 PI 调节器由于电压跌落会发生饱和，因此在发生短路时需同时将定电压控制的电压参考值由额定电压变为输出电压采样值，来防止 PI 调节器饱和，为后续故障切除后电压恢复及 BIMMDCT 恢复正常运行提供保证。

上述限流措施共同构成了 FCCLC 策略，实现了软、硬件的协同配合，不仅能有效抑制故障电流的峰值，还可以使故障后稳态电流尽可能小，有效降低了直流断路器的切断容量需求。

LVDC 侧正、负极发生接地短路故障或双极短路故障时低压侧正极或负极端口电压会几乎跌落为 0，同时电流急剧上升，利用上述特点构建 FCCLC 的启动方案，启动判据为：

$$\begin{cases} (V_{\mathrm{LVp}} < V_{\mathrm{th}}) \cap (I_{\mathrm{LVp}} > I_{\mathrm{th}}) \text{正极短路故障} \\ (V_{\mathrm{LVn}} < V_{\mathrm{th}}) \cap (I_{\mathrm{LVn}} > I_{\mathrm{th}}) \text{负极短路故障} \end{cases} \tag{2}$$

式中：V_{LVp} 和 V_{LVn} 分别为低压侧正极母线电压和负极母线电压；I_{LVp} 和 I_{LVn} 分别为低压侧正极母线电流和负极母线电流；V_{th} 和 I_{th} 分别为启动电压和启动电流，取值为允许 BIMMDCT 长期运行的最小电压和最大电流。

当 LVDC 侧发生正极短路故障时，BIMMDCT 从正常运行模式切换为 FCCLC 模式，切除 LVDC 正极端口电容，同时在第一 H 桥和第三 H 桥增加内移相来减小 MVDC 侧向 LVDC 侧传输的功率，LVDC 正极端口定电压控制的参考电压变为故障时的采样电压防止 PI 调节器饱和，这样，负极通过第二 H 桥和第四 H 桥仍能正常传输功率不受影响，如图 7 所示。LVDC 侧发生负极短路故障同理。当同时满足式（2）中正极短路故障和负极短路故障时，说明发生了双极短路故障，此时正负极端口电容同时切除，第一至第四 H 桥全部增加内移相，以及 LVDC 侧正负端口定电压控制的参考值变为故障时的采样电压。因此采用 FCCLC 策略能有效抑制故障端口电流，且不会影响正常极的功率传输。

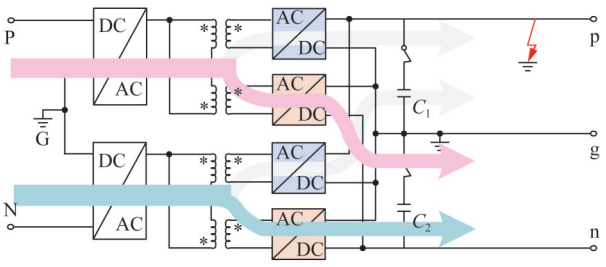


图 7　BIMMDCT 单极接地故障下的功率传输

Fig. 7　Power transfer under unipolar ground fault in BIMMDCT

2.3　切除故障后 BIMMDCT 自恢复控制

当系统中的短路故障被切除时，故障极电压会自动上升，一旦故障极电压上升到阈值 V_{ret} 时，BIMMDCT 将由 FCCLC 自动切换为正常控制模式，为确保系统的稳定性和安全性，电压阈值 V_{ret} 选取为 60% 的额定电压。具体操作步骤如下。

1）投入故障极端口电容；

2）将并联接入故障极的 H 桥内移相比 d_θ 由 1 变为 0；

3）将故障极定电压控制的电压参考值恢复为额定电压。

综上，BIMMDCT 的综合限流控制及恢复控制如图 8 所示。在双极 LVDC 配电网发生单极接地或双极短路故障情况下，当满足启动判据时，BIMMDCT 自动切换为 FCCLC 抑制故障电流。切除故障后，故障极电压自动恢复，上升至阈值电压时 BIMMDCT 切换为正常运行模式，双极 LVDC 配电网恢复正常运行。

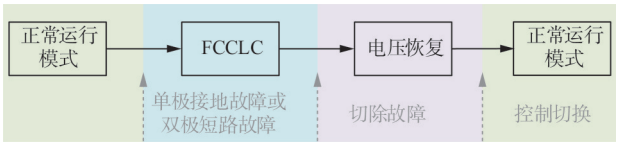


图 8 BIMMDCT 故障综合限流及恢复过程

Fig. 8 FCCLC and recovery process for BIMMDCT

3 双极 LVDC 配电网故障特征分析

3.1 故障等值建模

为分析双极 LVDC 配电网故障特征，以图 9 所示含有多分支的双极 LVDC 配电网拓扑为例进行故障等值建模。在图 9 中，B1—B6 为母线，其中 B1、B4 为正极对地母线，B3、B6 为负极对地母线，B2、B5 为正极对负极母线；F1—F4 为直流负荷；f_1、f_3 为馈线故障，同时为双极直流配电系统单极接地故障，f_2 为双极直流配电系统双极短路故障；K1—K14 为直流断路器，i_1—i_{14} 为直流断路器上流过的电流，电流方向规定为由母线流向线路为正。

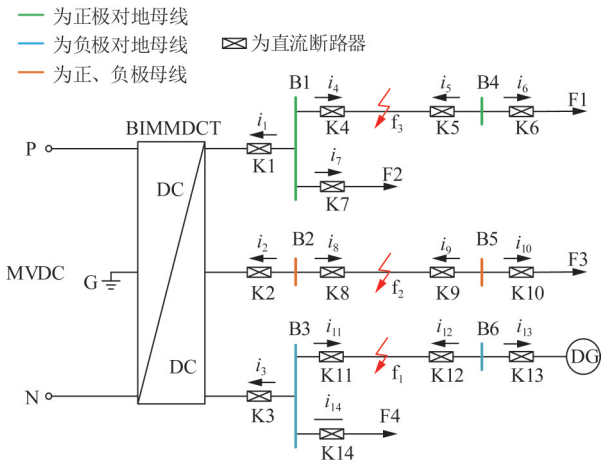
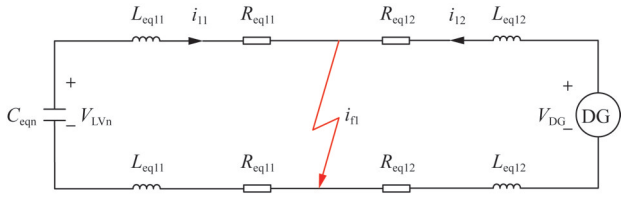


图 9 双极 LVDC 配电网结构及故障示意图

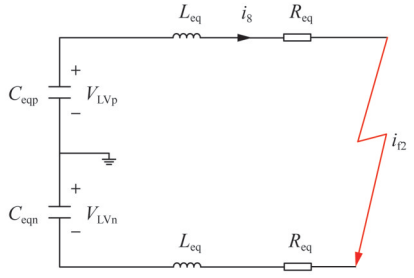
Fig. 9 Bipolar LVDC distribution structure and fault schematic

3.1.1 单极接地故障分析

由于双极直流配电网发生单极接地故障时不会影响另一极的功率正常传输，所以在负极母线发生 f_1 故障时正极仍可正常传输功率不受影响。此外，由于 LVDC 配电网电压等级较低，分支线路多且馈线短，其线路分布式电容可忽略不计。故障 f_1 的等值电路如图 10(a)所示。在单极接地故障 f_1 发生后，所有支路电流都将流向故障点 f_1，由于电流 i_{14} 所在支路为负荷支路，直流负荷一般采用负荷单向功率接口，属于无源支路，所以其所在支路并不会向故障点馈送电流，可以作为开路分析[26]。而分布式电源 DG 所在支路会向 f_1 输送电流，电流 i_{12} 由下游的分布式电源 DG 提供。图 10(a)中 R_{eq11}、L_{eq11} 和 R_{eq12}、L_{eq12} 分别代表故障点 f_1 到负极母线之间的线路等效电阻和等效电感以及故障点 f_1 到下游分布式电源之间的馈线等效电阻和等效电感；C_{eqn} 为 BIMMDCT 低压端口负极电容；V_{LVn} 为 BIMMDCT 的负极电压；i_{f1} 为故障电流。



(a) 单极接地故障等值电路



(b) 双极短路故障等值电路

图 10 单、双极故障等值电路

Fig. 10 Unipolar and bipolar fault equivalent circuit

根据图 10(a)，有：

$$\begin{cases} i_{f1} = i_{11} + i_{12} \\ V_{LVn} = 2\left(L_{eq11}\dfrac{\mathrm{d}i_{11}}{\mathrm{d}t} + R_{eq11}i_{11}\right) \\ V_{DG} = 2\left(L_{eq12}\dfrac{\mathrm{d}i_{12}}{\mathrm{d}t} + R_{eq12}i_{12}\right) \end{cases} \tag{3}$$

假设故障发生在 t=0 时刻，由式(3)可得故障电流 i_{f1}：

$$\begin{cases} i_{11} = \left(I_{11} - \dfrac{V_{LVn}}{2R_{eq11}}\right)\mathrm{e}^{-\frac{R_{eq11}}{L_{eq11}}t} + \dfrac{V_{LVn}}{2R_{eq11}} \\ i_{12} = \left(-I_{11} - \dfrac{V_{DG}}{2R_{eq12}}\right)\mathrm{e}^{-\frac{R_{eq12}}{L_{eq12}}t} + \dfrac{V_{DG}}{2R_{eq12}} \\ i_{f1} = \dfrac{R_{eq11}V_{DG}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{R_{eq12}}{L_{eq12}}t}\right) + R_{eq12}V_{LVn}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{R_{eq11}}{L_{eq11}}t}\right)}{2R_{eq11}R_{eq12}} + \\ \qquad I_{11}\left(\mathrm{e}^{-\frac{R_{eq11}}{L_{eq11}}t} - \mathrm{e}^{-\frac{R_{eq12}}{L_{eq12}}t}\right) \end{cases} \tag{4}$$

式中I_{11}为故障前i_{11}的稳态电流。

3.1.2　双极短路故障分析

当双极直流配电网发生最严重的双极短路故障时，此时故障电流最大，双极短路故障f_2的等值电路如图10(b)所示。其中C_{eqp}为BIMMDCT低压端口正极电容；V_{LVp}为BIMMDCT低压端口正极电压；R_{eq}和L_{eq}分别为故障点f_2到正负极母线之间的线路等效电阻和等效电感；i_{f2}为故障电流。

由图10(b)不难得出：

$$V_{LVp}+V_{LVn}=2\left(L_{eq}\frac{\mathrm{d}i_8}{\mathrm{d}t}+R_{eq}i_8\right) \tag{5}$$

假设故障发生在t=0时刻，由式(5)可得故障电流i_{f2}为：

$$i_{f2}=i_8=\left(I_8-\frac{V_{LVp}+V_{LVn}}{2R_{eq}}\right)\mathrm{e}^{-\frac{R_{eq}}{L_{eq}}t}+\frac{V_{LVp}+V_{LVn}}{2R_{eq}} \tag{6}$$

式中I_8为故障前i_8的稳态电流。

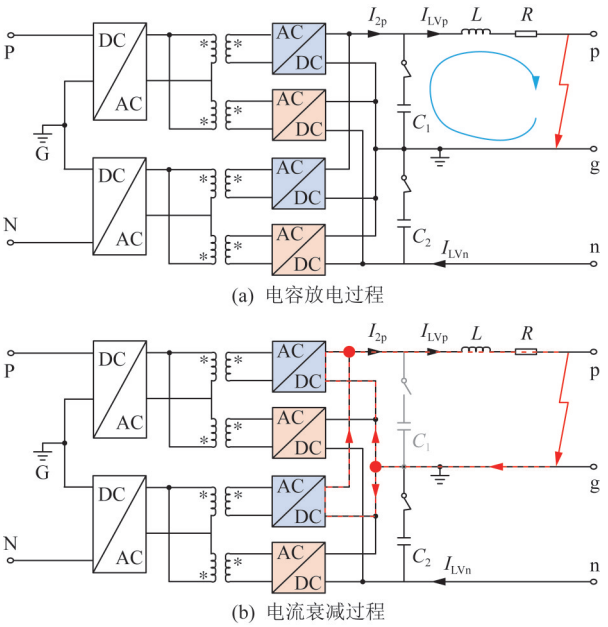
3.2　故障电流及电压特性分析

双极直流配电网中无论是发生单极接地故障还是双极短路故障，故障极的电压都会跌落几乎为0，与单极直流配电网相比，双极直流配电网在发生单极接地故障时，非故障极不受影响仍可正常传输功率，且受到的电压波动不大。因此，在发生故障时需要着重分析的是故障电流的影响。由于LVDC配电网电压等级低，额定负载电阻很小，因此本节以最常发生的金属性短路分析。

3.2.1　单极接地故障时的电流特性分析

双极直流配电网发生单极接地故障后，故障极电压变为0，故障极的定电压控制不再有效。以正极故障为例，FCCLC策略的投入有一定的延迟。在投入综合主动限流控制策略之前，BIMMDCT故障极的直流链路电容器将向外部电路放电，导致低压侧电流急剧增加。在投入FCCLC策略后，切断了直流链路电容器，电流进入衰减阶段。因此，单极接地故障发生后，整个放电过程可以分为两个阶段，如图11所示。

输出电压及输出电流的微分方程及初值如式(7)所示，其中t_f为短路时刻，L和R分别为接地故障点到正极母线的等效电感及等效电阻，R_{load}为正常运行时正极母线上的负载。



(a) 电容放电过程

(b) 电流衰减过程

图11　单极接地故障短路电流示意图

Fig. 11　Diagram of short-circuit current for unipolar earth fault

$$\begin{cases} C\dfrac{\mathrm{d}u_{LVp}}{\mathrm{d}t}=I_{2p}-i_{LVp} \\ L\dfrac{\mathrm{d}i_{LVp}}{\mathrm{d}t}=u_{LVp}-Ri_{LVp}-R_{load}i_{LVp} \\ u_{LVp}(t_f)=V_{LVp} \\ i_{LVp}(t_f)=I_{LVp} \end{cases} \tag{7}$$

在电容放电阶段，电容电压及输出电流的表达式如式(8)所示。

$$\begin{cases} u_{C1}(t)=\dfrac{\omega_0}{\omega}V_{LVp}\mathrm{e}^{-\delta(t-t_f)}\sin\left[\omega(t-t_f)+\beta\right] \\ i_{LVp}(t)=\dfrac{1}{\omega L}V_{LVp}\mathrm{e}^{-\delta(t-t_f)}\sin\left[\omega(t-t_f)\right]+I_{2p} \end{cases} \tag{8}$$

式中：$u_{C1}(t)$为正极电容上的电压；$\delta=R/2L$，为衰减阻尼系数；$\omega_0=\sqrt{1/LC_1}$，为振荡角频率；$\omega=\sqrt{\omega_0^2-\delta^2}$，为RLC电路的谐振角频率；$\beta=\arctan(\omega/\delta)$。

假设检测到故障的时刻为t_a，在t_a时刻FCCLC投入，可以得到低压侧电流i_{LVp}的最大值I_{max}为：

$$I_{max}=\frac{1}{\omega L}V_{LVp}\mathrm{e}^{-\delta t_a}\sin(\omega t_a)+I_{2p} \tag{9}$$

FCCLC投入后切除输出电容，如图11(b)所示，此时由MVDC侧向LVDC侧提供的电流I_{2p}近似为0，在此阶段输出电压保持为0，输出电流在短路回路中开始衰减直至稳定，电流衰减持续时间t_b，衰减规律如式(10)所示。

$$i_{\mathrm{LVp}}(t)=(I_{\max}-I_{2\mathrm{p}})\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}(t-t_{\mathrm{f}}-t_{\mathrm{a}})}+I_{2\mathrm{p}}=I_{\max}\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}(t-t_{\mathrm{f}}-t_{\mathrm{a}})} \tag{10}$$

$$t_b=\frac{5L}{R} \tag{11}$$

正极接地故障时的正极故障电流计算值与仿真值对比如图 12 所示，其中接地故障点到正极母线的等效电感 L 及等效电阻 R 分别为 1 mH 和 0.112 5 Ω，C_1 为 20 mF，采样率为 10 kHz，FCCLC 检测到故障的时间为 200 μs，因此 t_a 为 200 μs。由图 12 可见，发生单极接地故障时故障电流计算值与仿真值高度拟合，式(10)可较为准确地反映单极接地故障时的故障电流发展趋势。

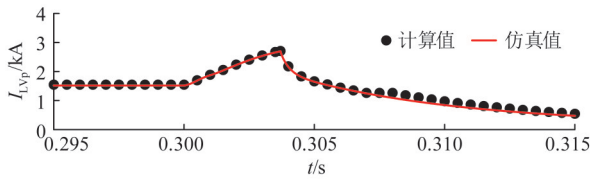


图 12 单极接地故障时故障电流计算值与仿真值对比

Fig. 12 Comparison between calculated and simulated values of fault current during a single-phase-to-ground fault

3.2.2 双极短路故障时的电流特性分析

双极直流配电网发生最严重的双极短路故障后，故障电流上升迅速且峰值较高，而电力电子器件在故障后会很快闭锁，必须以最快的速度切除故障。与单极接地故障类似，在发生故障后 LVDC 侧正负极电压均跌落为 0，且 BIMMDCT 的定电压控制不再有效。如图 13 所示，双极短路故障发生后整个放电过程也分为两个阶段，电容放电阶段及电流衰减阶段。

与单极接地故障不同的是，双极短路故障发生后正负极电容同时在短路回路放电，因此故障电流相比单极接地故障上升更为迅速且峰值更高，电容电压及低压侧电流表达式如式(12)所示。

$$\begin{cases} u_{\mathrm{C}}(t)=\dfrac{\omega_0}{\omega}V_{\mathrm{LV}}\mathrm{e}^{-\delta(t-t_{\mathrm{f}})}\sin\left[\omega(t-t_{\mathrm{f}})+\beta\right] \\ i_{\mathrm{LVp}}(t)=\dfrac{1}{\omega L}V_{\mathrm{LV}}\mathrm{e}^{-\delta(t-t_{\mathrm{f}})}\sin\left[\omega(t-t_{\mathrm{f}})\right]+I_{2\mathrm{p}} \end{cases} \tag{12}$$

式中：$\omega_0=\sqrt{1/LC_1}$，为振荡角频率；$u_{\mathrm{C}}(t)$为正负极电容上的电压；$V_{\mathrm{LV}}=V_{\mathrm{LVp}}+V_{\mathrm{LVn}}$。

双极短路故障下低压侧电流的最大值 $I_{\max}$ 为：

$$I_{\max}=\frac{1}{\omega L}V_{\mathrm{LV}}\mathrm{e}^{-\delta t_{\mathrm{a}}}\sin(\omega t_{\mathrm{a}})+I_{2\mathrm{p}} \tag{13}$$

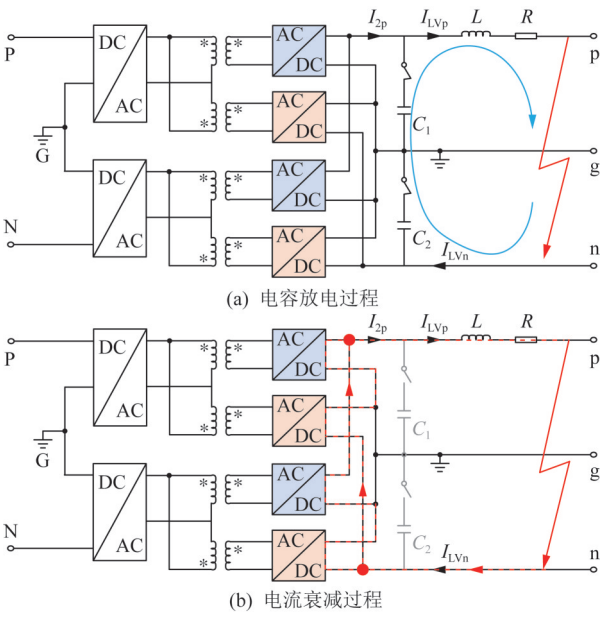


图 13 双极短路故障短路电流示意图

Fig. 13 Sketch diagram of short-circuit current for bipolar short-circuit fault

在一定的延迟后 FCCLC 投入，MVDC 侧向 LVDC 侧提供的电流 $I_{2\mathrm{p}}$ 近似为 0，4 个交错并联的 H 桥与短路点形成故障回路，短路电流经 4 个 H 桥进入衰减阶段直至稳定，衰减规律如式(14)所示。

$$i_{\mathrm{LVp}}(t)=(I_{\max}-I_{2\mathrm{p}})\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}(t-t_{\mathrm{f}}-t_{\mathrm{a}})}+I_{2\mathrm{p}}=I_{\max}\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}(t-t_{\mathrm{f}}-t_{\mathrm{a}})} \tag{14}$$

双极短路故障时故障电流计算值与仿真值对比如图 14 所示，其中各参数与单极接地故障时参数一致。由图可见，发生双极短路故障时故障电流计算值与仿真值高度拟合，式(14)可较为准确地反映双极短路故障时的故障电流发展趋势。

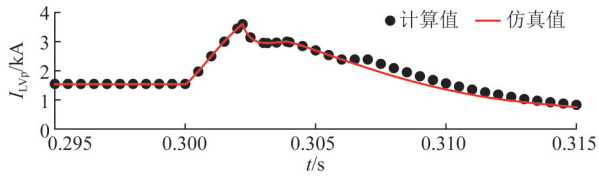


图 14 双极短路故障时故障电流计算值与仿真值对比

Fig. 14 Comparison between calculated and simulated values of fault current during a two-phase short-circuit fault

3.3 带过渡电阻特性分析

单极接地故障除金属性接地故障外还有经过渡电阻接地故障。以正极母线发生单极接地故障 f_3 为

例分析，故障等值模型如图 15 所示，其中 L_{eq4}、R_{qe4} 分别为故障点 f_3 到正极母线之间的线路等效电感和等效电阻，R_l 为接地电阻，i_4 为线路流过电流，i_{f3} 为故障电流。

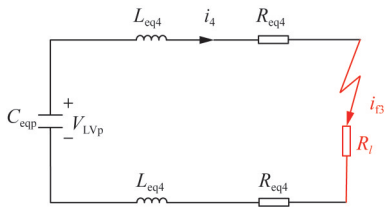


图 15　带过渡电阻的单极接地等值电路

Fig. 15　Unipolar equivalent circuit with transition resistor

根据图 15，有：

$$V_{LVP} = 2L_{eq4}\frac{\mathrm{d}i_{f3}}{\mathrm{d}t} + i_{f3}\left(2R_{eq4} + R_l\right) \tag{15}$$

故障电流 i_{f3} 为：

$$i_{f3} = \left(I_4 + \frac{V_{LVp}}{2R_{eq4} + R_l}\right)\mathrm{e}^{\frac{2R_{eq4}+R_l}{2L_{eq4}}t} - \frac{V_{LVp}}{2R_{eq4} + R_l} \tag{16}$$

式中 I_4 为故障前 i_4 的稳态电流。

双极 LVDC 配电网电压等级低，额定负载电阻很小，当过渡电阻较大时，故障特性十分微弱，甚至远小于过负荷电流，因此本文的过渡电阻 R_f 采用小于负载电阻来分析。

4　双极 LVDC 配电网保护方案

4.1　基于电流积分平均值的故障识别判据

双极 LVDC 配电网与单极 LVDC 配电网发生故障时电流特征分布类似，各支路电流都会向故障点流入，利用故障电流的分布特性可构建故障识别判据。如图 16 所示为发生区内、区外故障的故障电流流向示意图。图 16(a)为区内发生故障 f_1，DCCB1 和 DCCB2 上的电流均流向故障点 f_1。f_2 和 f_3 故障电流流向示意图如图 16(b)和图 16(c)所示，DCCB 上的电流均流向故障点 f_2 和 f_3。

由于在发生馈线故障时负荷支路属无源支路，所以在负荷支路的上级馈线发生短路故障时负荷支路不会有电流流向馈线支路，会对故障方向识别造成影响。因此，采用式(17)中的电流故障分量 Δi 来构建故障识别判据，从而消除无源支路无法馈流的现象。

$$\Delta i = i_f - i_{f0} \tag{17}$$

式中：i_f 为故障电流；i_{f0} 为故障电流上一时刻的采样值。

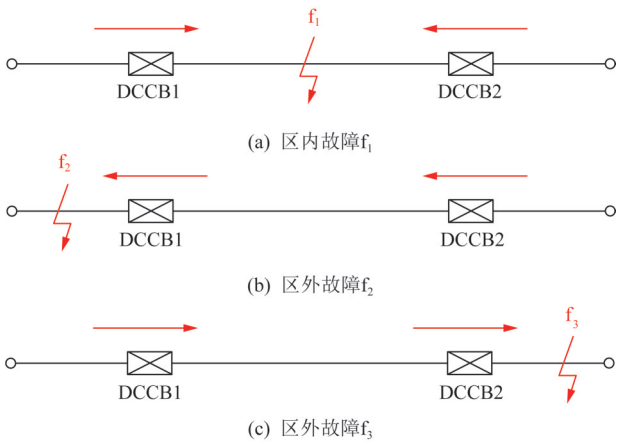


图 16　区内区外故障电流流向示意图

Fig. 16　Internal and external fault current flow direction diagram

当发生区内故障时，以图 16(a)为例，对于 DCCB1 和 DCCB2 来说，f_1 为正向故障，因此 DCCB1 和 DCCB2 上的 Δi 均为正，当发生区外故障时，以图 16(b)为例，对于 DCCB1 来说 f_2 为反向故障，对于 DCCB2 来说，f_2 为正向故障，因此 DCCB1 上的 Δi 为负，DCCB2 上的 Δi 为正，具有明确的指向性特征，可构建基于电流积分平均值指示变量如式(18)所示。

$$W = \frac{1}{n+1}\sum_{k}^{k+n}\int_{t}^{t+\Delta t}\Delta i_f \mathrm{d}t \tag{18}$$

式中：Δt 为计算时间窗；k 为离散采样点数量；n 为计算指示变量 W 的平均参数。

在发生正向故障时，式(18)中的指示变量 W 为正，发生反向故障时 W 为负，因此，可以利用指示变量 W 的正负进行故障识别，考虑采样过程中的噪声信号和离散采样误差影响，故障识别判据为：

$$\begin{cases} \dfrac{W}{W_{set}} > 1, \text{正向故障} \\ \dfrac{W}{W_{set}} < -1, \text{反向故障} \end{cases} \tag{19}$$

式中 W_{set} 为保护设定的门槛值。

在发生正向故障时应保证 W 始终大于 W_{set}，反向故障时保证 W 始终小于 $-W_{set}$。工程实际中，噪声信号一般不会改变测量信号极性，采样坏点虽然可能改变信号极性，但出现概率较低。正常运行时 W 的绝对值一般不会大于 10^{-4}，而发生故障时其绝对值会远大于 0.1，为留有一定阈值，选取 W_{set}= 0.01，可以保证正常运行时 $-1 \leqslant W/W_{set} \leqslant 1$，正向故

障时 $W/W_{set}>1$，反向故障时 $W/W_{set}<-1$，因此，式(19)能够可靠识别故障方向。

通过BIMMDCT的输出电压来构建闭锁元件，当 V_{dc} 大于 V_{dcset} 时，发出闭锁信号，小于 V_{dcset} 时，闭锁信号置于低电平，若指示变量 W 在离散采样点连续5次及以上满足式(19)中的方向判别，同时闭锁信号置于低电平时，则保持其方向判断结果，闭锁元件为

$$V_{dc} \leqslant V_{dcset} \tag{20}$$

式中 V_{dcset} 为闭锁元件的整定值，选取为70 %的额定电压[26]。

4.2 双极LVDC配电网保护方案

考虑到双极LVDC配电网中通讯条件的限制，我们可以采用仅保留基于故障方向信息和延时配合的保护方案。由于双极LVDC配电网的供电半径小，馈线分级数少，这种延时配合方案足以满足故障快速隔离及后备保护的需求。本文以辐射型双极LVDC配电网结构为例进行分析，其保护方案分为馈线保护和母线保护，如图17所示。

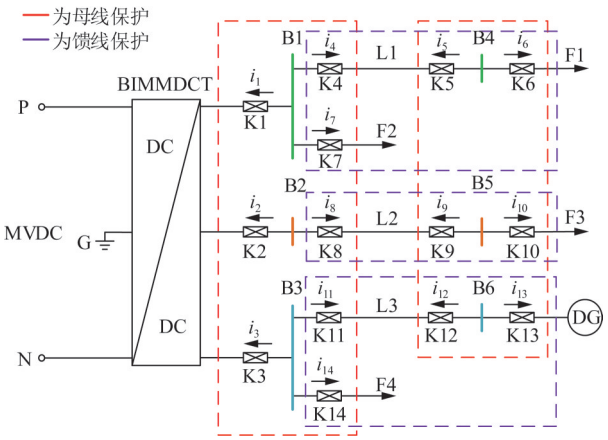


图17 双极LVDC配电网保护配置

Fig. 17 Protection configuration in bipolar LVDC distribution network

4.2.1 馈线保护方案

馈线故障时，故障馈线两端的指示变量均为正，若经过5个采样点故障判别方向不变且闭锁元件为低电平，则确定正向故障，通过分段时间配合来实现保护的选择性，并且上游保护能作为下游保护的远后备保护，馈线保护判据为：

$$\left(\frac{W_1}{W_{set}}>1\right)\cap\left(\frac{W_2}{W_{set}}>1\right)\cap(V_{dc}\leqslant V_{dcset})\cap(t\geqslant t_{set}) \tag{21}$$

式中：W_1、W_2 分别为馈线两端指示变量(对于负荷支路仅有一端指示变量)；t_{set} 为保护延时整定值。

t_{set} 的整定原则为：

$$t_{set}=t_0+(M-m)\Delta t \tag{22}$$

式中：t_0 为保护识别故障时间；M 为馈线分级最大值；m 为待整定级；Δt 为保护延时。

其中 Δt 的整定方法为：

$$\Delta t=t_{cut}+t_{rec}+t_{rel} \tag{23}$$

式中：t_{cut} 为断路器的故障切除时间；t_{rec} 为电压恢复时间；t_{rel} 为时间裕度。

以单端辐射型双极LVDC配电网为例，保护方案的动作时间整定配合如图18所示，上游保护能可靠承担下游保护的远后备保护。

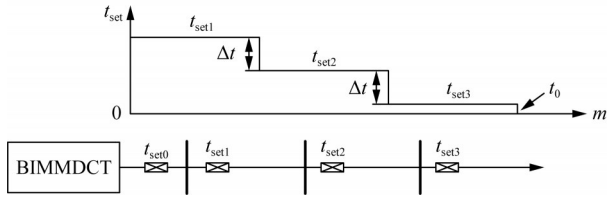


图18 双极LVDC配电网保护时间配合方案

Fig. 18 Protection time coordination scheme of bipolar LVDC distribution network

4.2.2 母线保护方案

当发生母线故障时，与故障母线所连接的所有馈线上的指示变量均为负。而馈线故障时，与母线相连的故障馈线上的指示变量为正，其他正常馈线上的指示变量均为负，与母线故障时的所有指示变量不一致，因此，采用式(18)—(19)能可靠识别母线故障和馈线故障。母线保护判据为：

$$\begin{aligned}&\left(\frac{W_{m1}}{W_{set}}<-1\right)\cap\left(\frac{W_{m2}}{W_{set}}<-1\right)\cap\cdots\\&\cap\left(\frac{W_{mn}}{W_{set}}<-1\right)\cap(V_{dc}\leqslant V_{dcset})\end{aligned} \tag{24}$$

式中 W_{m1}—W_{mn} 为与母线相连所有馈线上的指示变量。

以图17所示的母线B1故障为例，当母线B1发生故障时，K1、K4和K7处的指示变量方向都会发生改变，由正常运行时的正向变为母线故障时的反向。当L1发生故障时，K4和K5处的指示变量判定结果均为正，不满足式(24)，与母线故障时的结果完全不同。因此，采用本文所提方向判据可有效区分母线故障与馈线故障。

4.3　FCCLC 与保护方案的协调配合

考虑到工程中保护装置的实际采样频率一般在几万赫兹的水平，本文算例的采样率为 10 kHz，则每 100 us 可以得到 1 个直流电压或电流采样点。为了保证 FCCLC 在限流后不会导致保护拒动，在 FCCLC 检测到故障后加入一个延时 ΔT，延时结束后投入，给保护充分的故障识别时间。限流与保护是同时介入的，以图 19 为例说明，馈线故障发生后，FCCLC 检测到故障的时间为 2 个采样点即 200 μs，加入延时 ΔT=500 μs，而保护的故障识别时间为 5 个采样点即 500 μs，完全能保证故障线路的识别。加入延时 ΔT 后 FCCLC 的投入需要 700 μs，考虑到保护及断路器的动作时间，直流故障的处理时间一般为故障后数毫秒至数十毫秒，此时 FCCLC 已将故障电流限制下来，如图 19 所示，能有效降低直流断路器的开断容量需求。

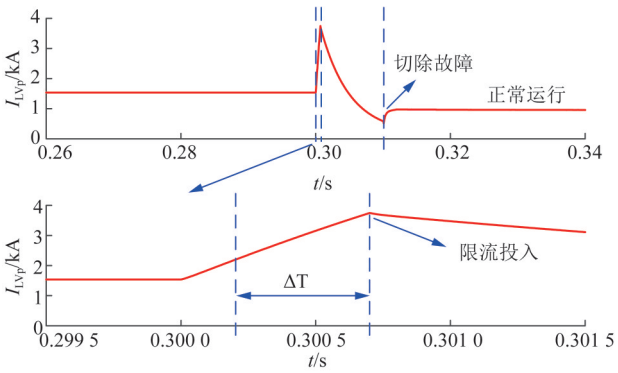


图 19　FCCLC 与保护协调配合

Fig. 19　FCCLC and protection coordination and cooperation

5　仿真验证

为了验证所提方案的有效性，在 MATLAB/Simulink 中搭建了如图 20 所示的双极 LVDC 配电网保护模型。图 20 中，BIMMDCT 的容量为 2.5 MW，DG 的容量均为 200 kW，各负荷的容量分别是 200 kW、300 kW、500 kW，各馈线的长度也在图中标注。其中 DG1 为光伏电源，DG2 为储能，F1—F6 为负荷。f_{b1}、f_{b2} 和 f_{b3} 为母线故障，f_1—f_4 为馈线故障。仿真模型具体参数见表 1。

5.1　故障综合限流控制策略验证

对于馈线故障 f_1，为 LVDC 侧正极接地故障，采取传统限流措施的仿真结果如图 21 所示，在发生故障时仅切除端口电容。图 21 中 V_{LVp}、I_{LVp}、V_{LVn}、I_{LVn} 分别代表 LVDC 侧正极电压、正极电流、负极电压和负极电流。0.3 s 时发生故障，LVDC 侧正极电容通过短路回路放电，正极电压跌落为 0，正极电流迅速上升，检测到故障后切除端口电容，LVDC 侧正极定电压控制不再有效，PI 调节器饱和，故障电流稳定在 2 倍的额定电流。由于双极结构，负极不受正极故障的影响，仍能正常传输功率。

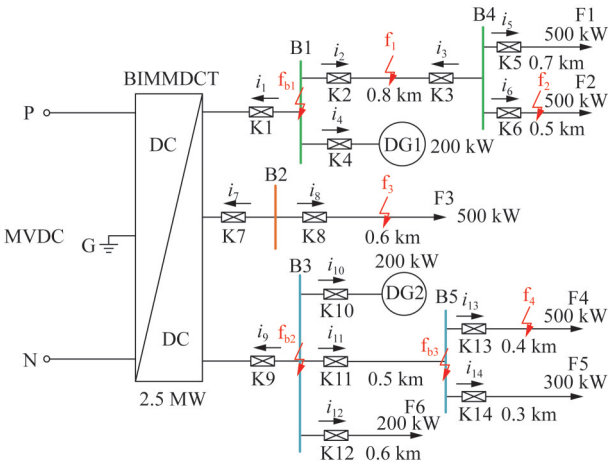


图 20　双极 LVDC 配电网仿真模型

Fig. 20　Simulation model of bipolar LVDC distribution network

表 1　仿真系统参数

Tab. 1　Simulation system parameters

仿真参数	数值	仿真参数	数值
MVDC 侧额定电压/kV	10	开关频率 f/kHz	10
LVDC 侧额定电压/V	750	传输电感 $L_{1,2,3,4}$/uH	10
LVDC 侧稳压电容 C_p、C_n /mF	20	中频变压器变比 nT	10 000/750
子模块电容 C_{sm}/mF	5	线路电阻 r_0 /(Ω·km^{-1})	0.05
单个桥臂级联子模块数 N	5	线路电感 l_0 /(mH·km^{-1})	0.12
桥臂耦合电感 L_{arm}/mH，耦合系数	1，0.998	保护延时 Δt/ms	30

采用 FCCLC 策略的仿真结果如图 22 所示，通过切除电容及 BIMMDCT 的主动控制，将故障电流有效抑制到低于稳态电流。对比图 21 和图 22 可知，FCCLC 策略能有效降低故障电流的峰值及故障后稳态电流大小，实现 BIMMDCT 的故障穿越及限流。

图 23 给出了 BIMMDCT 低压侧正极发生单相接地故障时的交流测电压及电流波形。v_p 为

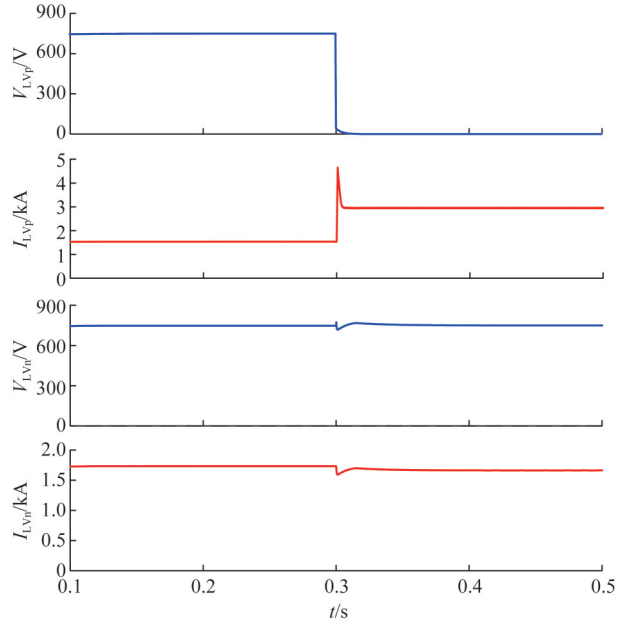


图 21 传统限流输出电压电流仿真结果

Fig. 21 Conventional current limiting output voltage and current simulation results

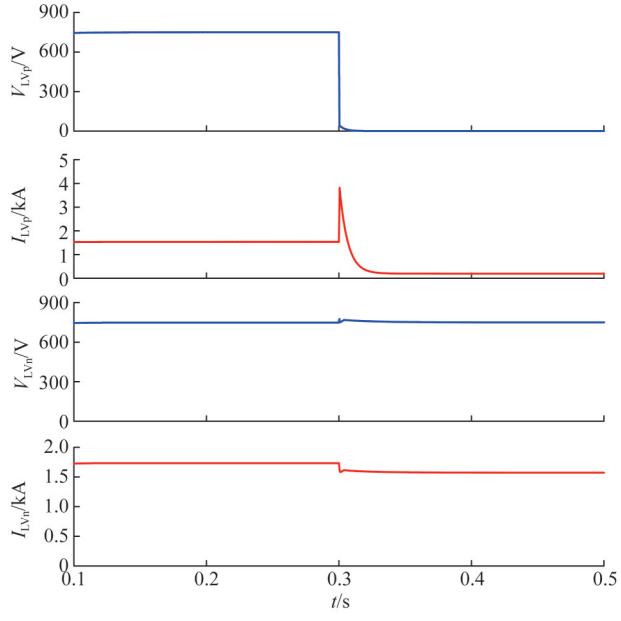


图 22 投入 FCCLC 后输出电压电流仿真结果

Fig. 22 Simulation results of output voltage and current with FCCLC

BIMMDCT 中压侧正极交流电压；v_{c1}为 BIMMDCT 低压侧第一 H 桥交流电压；v_{c2}为 BIMMDCT 低压侧第二 H 桥交流电压；i_{pa}为 BIMMDCT 中压侧正极交流电流；i_1为 BIMMDCT 低压侧第一 H 桥交流电流；i_2为 BIMMDCT 低压侧第二 H 桥交流电流。在发生正极接地故障后，v_{c1}跌落为 0，同时第一 H 桥的交流电流i_1由平顶波变为三角波，v_{c2}电压正常，第二 H 桥能正常传输功率，i_{pa}由于叠加了i_1和i_2，由平顶波变为类三角波。

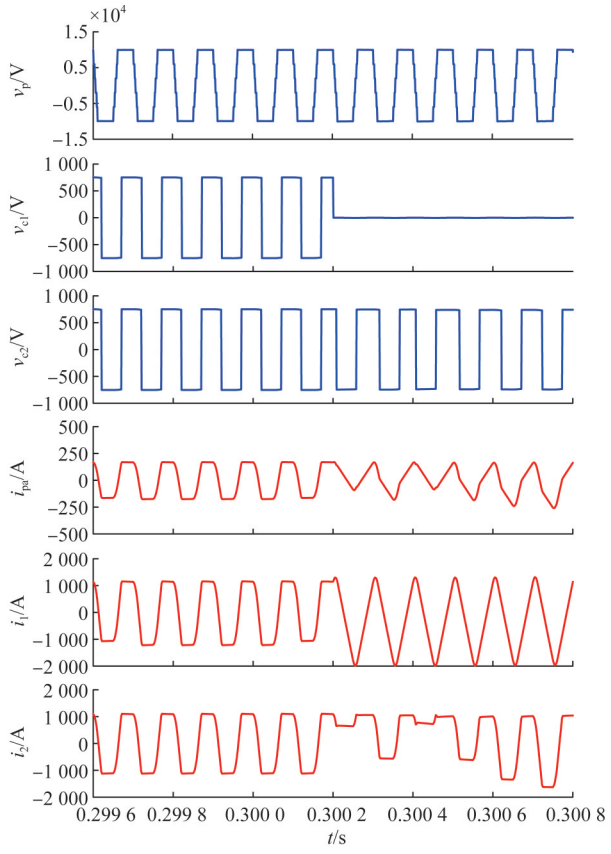


图 23 BIMMDCT 正极接地时交流侧电压及电流波形

Fig. 23 AC-side voltage and current waveforms during positive electrode ground fault in BIMMDCT

故障后 BIMMDCT 投入 FCCLC 控制策略、故障切除后恢复正常运行模式的全过程仿真结果如图 24 所示。图中V_{sm}为 BIMMDCT 原边 MMC 桥臂上的子模块电容电压。在 0.3 s 发生 f_1 故障，BIMMDCT 检测到故障迅速进入 FCCLC 模式，在 FCCLC 过程中，LVDC 侧负极电压及子模块电容电压均能维持稳定，实现不停机故障穿越。在 0.03 s 后直流断路器 K2、K3 动作切除故障 f_1，此时故障电流低于 BIMMDCT 正常运行时的稳态电流，有效降低了直流断路器的切断容量需求。切除故障后 BIMMDCT 退出 FCCLC 模式投入端口电容，直流电压能够迅速恢复，切换为正常控制模式，双极 LVDC 配电系统正常运行，在此期间，负极电压不受正极故障及 FCCLC 的影响，仍能正常传输功率。

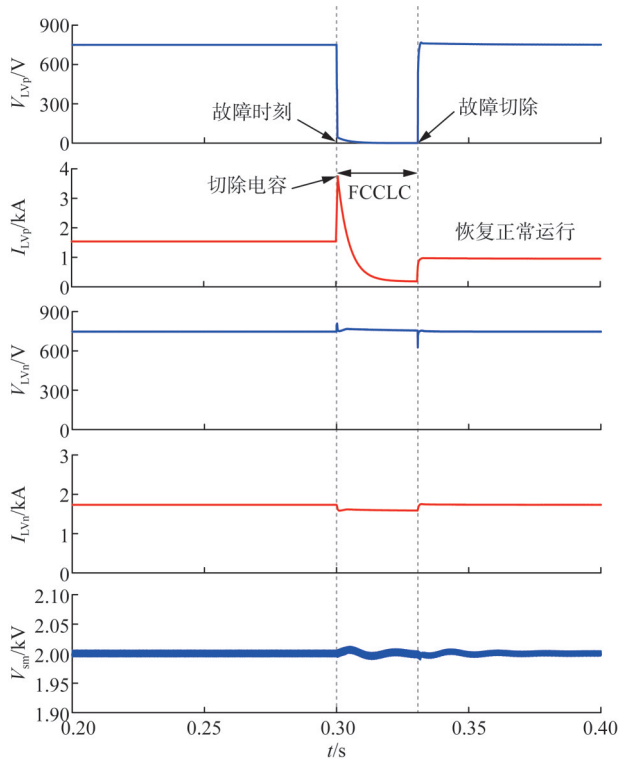
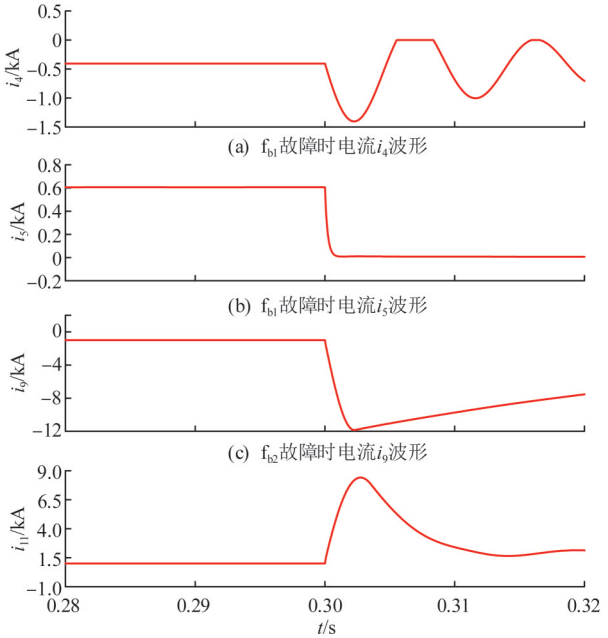


图 24　FCCLC 及故障恢复过程

Fig. 24　FCCLC and the fault recovery process



(a) f_{b1}故障时电流i_4波形

(b) f_{b1}故障时电流i_5波形

(c) f_{b2}故障时电流i_9波形

(d) f_{b3}故障时电流i_{11}波形

图 25　不同故障下的电流波形特征

Fig. 25　Current characteristics under different faults

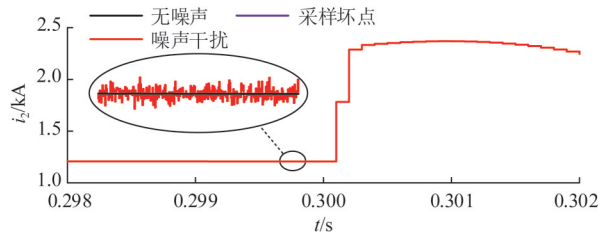
5.2　双极 LVDC 配电网保护方案验证

在 BIMMDCT 运行于正常状态下，0.3 s 时 LVDC 侧发生正负极接地故障，BIMMDCT 输出的故障电流仿真波形如图 25 所示。图 25 中给出了图 20 中 3 处母线故障（f_{b1}、f_{b2}、f_{b3}）下，不同保护测点的故障电流波形。故障 f_{b1} 对 K4 为反向故障，此时光伏电源会向电路中放电，电流 i_4 具有负的指向性。同时由于上级线路短路，处于下级线路 K5 处的负荷电流 i_5 迅速衰减至 0，如图 25 所示，电流 i_5 也具有负的指向性。对于 K9 来说，f_{b2} 是反向故障，对于 K11 来说，f_{b3} 是正向故障，由图 25 可见，在上述故障下，i_9 和 i_{11} 在不同母线故障下的指向性分别为负和正。综上，双极 LVDC 配电网在发生故障时电流具有明确的指向性，正向故障下，电流故障分量为正；反向故障下，电流故障分量为负。

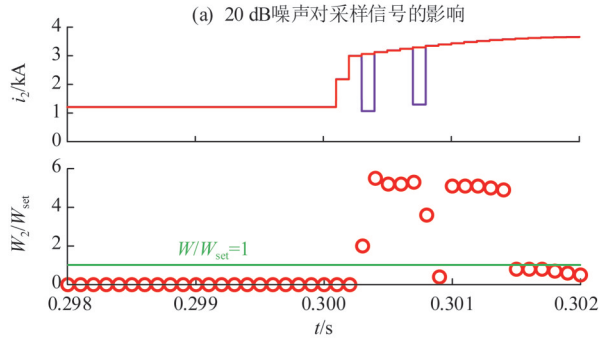
为验证所提故障识别判据的有效性，向采样数据中叠加高斯白噪声来模拟工程中的干扰信号。针对图 20 中的各种故障，在测量电流中加入 20 dB 的白噪声，同时为模拟实际情况，随机增加采样坏点，仿真结果如图 26 所示，在噪声干扰及采样坏点的情况下所提故障识别判据仍能有效识别故障方向。

在电力系统中时常会发生不同地点同时发生故障的情况，为验证该特殊情况下是否会对故障判据产生影响，对双极直流配电网前后发生正负极故障、同时发生正负极故障、负荷突增以及突然甩负荷等特殊情况进行了验证，仿真验证表明，故障识别判据在以上特殊情况下均能有效识别故障并使保护正确动作，仿真结果如图 27 所示。

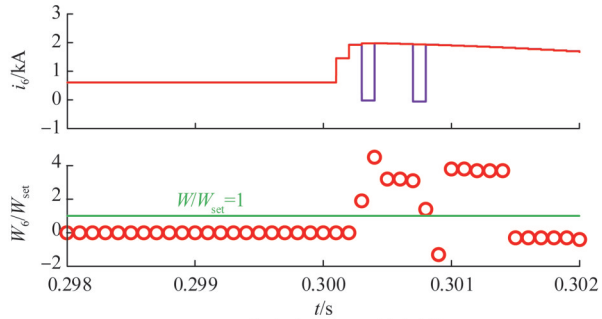
故障识别判据分析结果如表 2 所示。表中的数据为故障识别判据连续 5 点满足的情况下，正的最小值或负的最大值。由于双极 LVDC 配电网结构正极母线故障对于负极母线的功率传输几乎没有影响，因此表 2 中的各故障识别判据没有计及其他极故障时的判定结果。以母线故障 f_{b1} 为例，与母线 B1 相连的馈线故障识别判据 W_1、W_2、W_4 均小于 −1，满足式（24），母线保护瞬时动作，与母线 B1 相连的所有断路器断开。对于馈线故障 f_1，故障馈线上的 W_2 和 W_3 均大于 1，其余馈线的故障识别判据结果均小于−1，K2、K3 满足动作条件动作于隔离故障。K2 与 K5、K6 进行延时配合，K11 与 K13、K14 进行延时配合，上级线路作为下级线路的后备保护。由表 2 可见，所提故障识别判据在双极



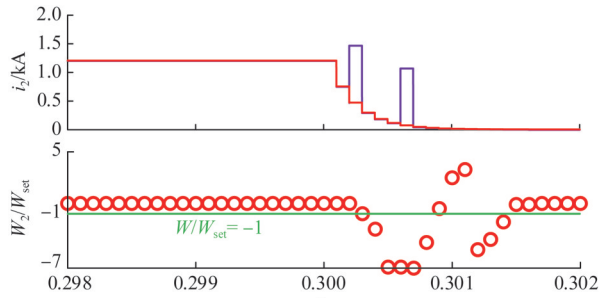
(a) 20 dB噪声对采样信号的影响



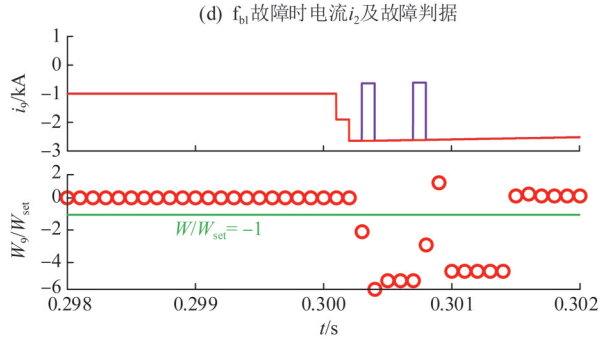
(b) f_1故障时电流i_2及故障判据



(c) f_2故障时电流i_6及故障判据



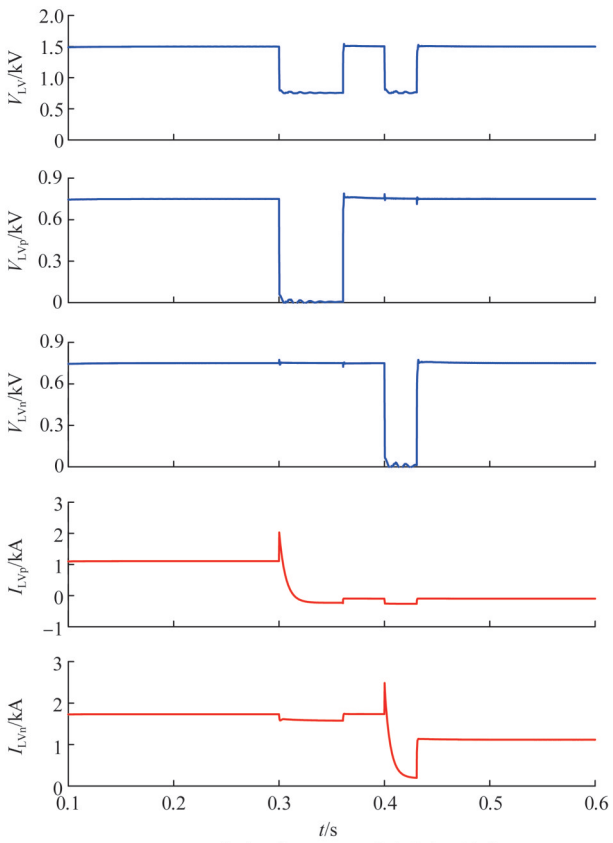
(d) f_{b1}故障时电流i_2及故障判据



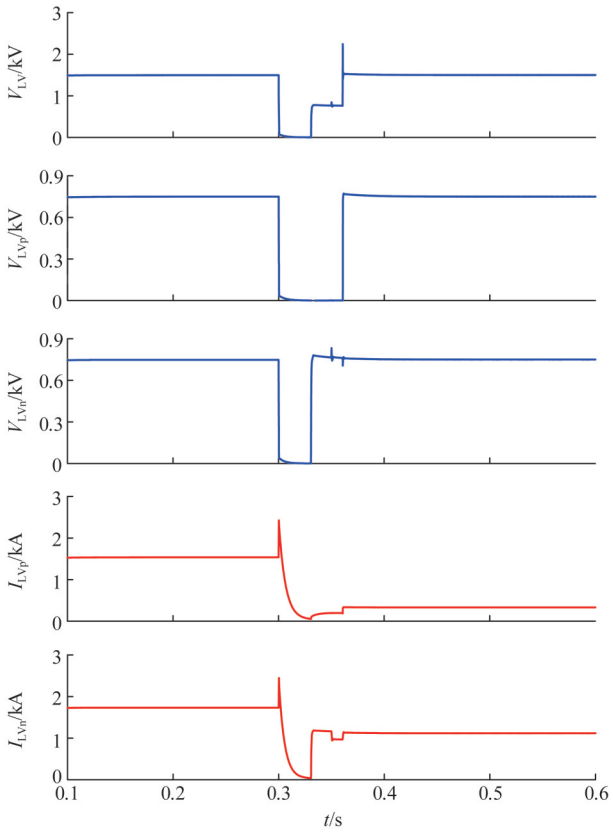
(e) f_{b2}故障时电流i_9及故障判据

图 26 故障识别判据的抗噪性能及抗扰性能

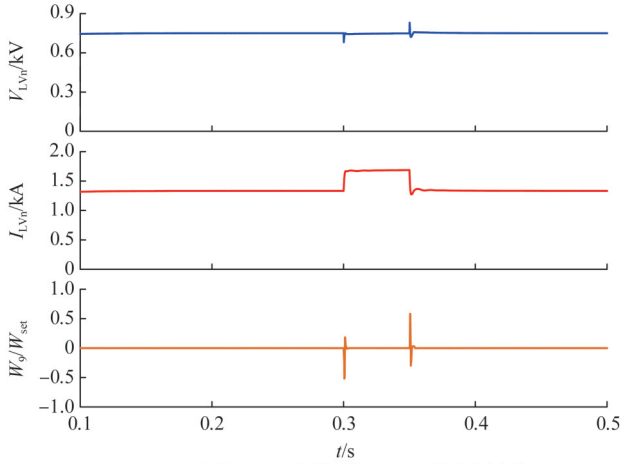
Fig. 26 Noise and disturbance immunity of fault identification criteria



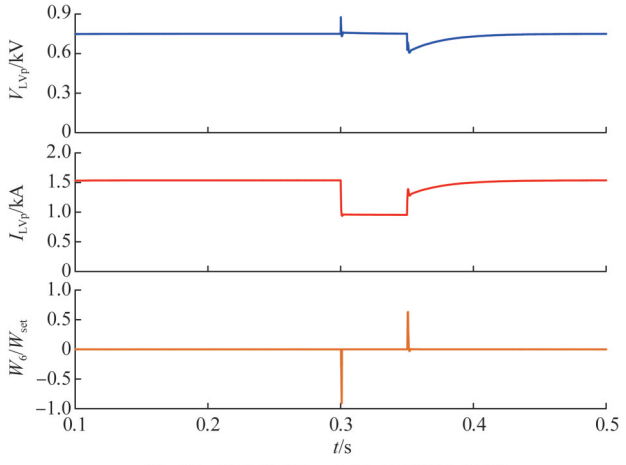
(a) 0.3 s发生正极f_1、0.4 s发生负极f_4故障



(b) 0.3 s同时发生正极f_1、负极f_4故障



(c) 负荷F4 0.3 s突增1倍，0.35 s恢复额定值



(d) 0.3 s切除负荷F_2，0.35 s重新投入负荷F_2

图27　特殊情况下故障识别判据判别情况

Fig. 27　Failure recognition criteria for special cases

表2　保护算法分析结果

Tab. 2　Analysis results of the protection algorithm

参数	f_{b1}	f_{b2}	f_{b3}	f_1	f_2	f_3	f_4
W_1/W_{set}	−5. 45			−2. 1	−2. 13		
W_2/W_{set}	−2. 46			2. 3	2. 31		
W_3/W_{set}	2. 46			1. 9	−2. 31		
W_4/W_{set}	−1. 23			−1. 1	−1. 1		
W_5/W_{set}	−1. 23			−2	−2. 02		
W_6/W_{set}	−1. 25			−2. 2	4. 33		
W_7/W_{set}	0. 63	0. 64	0. 34	0. 39	0. 31	−4. 87	0. 33
W_8/W_{set}	−0. 63	−0. 64	−0. 34	−0. 39	−0. 31	4. 87	−0. 33
W_9/W_{set}		−5. 09	−2. 45				−2. 45
W_{10}/W_{set}		−1. 23	−1. 12				−1. 11
W_{11}/W_{set}		−2. 85	3. 5				3. 5
W_{12}/W_{set}		−1. 58	−1. 12				−1. 14
W_{13}/W_{set}		−1. 71	−2. 39				5. 01
W_{14}/W_{set}		−1. 15	−1. 52				−1. 52

LVDC配电网测量电流中存在干扰情况下，仍能有效提取电流积分平均值进行方向判断，具有良好性能。

考虑带过渡电阻的单极接地故障，在不同过渡电阻下测试方向元件性能。针对馈线故障f_2，取额定负荷电阻的10 %、30 %、50 %为过渡电阻，分析结果在表3中给出，其中，故障识别判据的取值原则与表2中相同。测量电流中同样加入20 dB白噪声及随机坏点干扰，由表3可见，故障识别判据在过渡电阻条件下可实现故障方向正确判断，具有较强的抗干扰性能。

表3　带过渡电阻时保护性能测试

Tab. 3　Protection performance with transition resisters

R_f/%	W_1/W_{set}	W_2/W_{set}	W_3/W_{set}	W_4/W_{set}	W_5/W_{set}	W_6/W_{set}
10	−1. 22	1. 88	−1. 88	−1. 03	−2. 56	3. 61
30	−2. 31	2. 52	−2. 52	−0. 21	−1. 71	2. 82
50	−1. 63	1. 78	−1. 78	−0. 19	−1. 28	2. 08

6　结语

为确保双极直流配电网的安全运行，本文围绕故障电流的限制展开研究，提出通过控制BIMMDCT主动限制输出故障电流和内部过电流，从而有效防止BIMMDCT因过流闭锁而导致的大范围停电，并显著降低直流断路器的切断容量需求。本文还分析了双极直流配电网在单极和双极故障下的电流电压特性，构建了基于电流积分平均值的故障识别判据，能够有效判断故障方向。为了防止限流引起的保护拒动或误动，采用时间延时协同限流与保护措施。最终，通过仿真验证了所提保护方案的有效性，不仅在故障发生时能够抑制故障电流的大小，降低直流断路器的开断容量需求，故障识别判据也能有效提取电流积分平均值进行方向判断，展现出良好的性能，具备一定的抗干扰和抗噪能力，并能耐受过渡电阻的影响。

参考文献

[1] ZHAO S，CHEN Y，CUI S，et al. Three-port bidirectional operation scheme of modular-multilevel DC-DC converters interconnecting MVDC and LVDC grids［J］. IEEE Transactions on Power Electronics，2021，36(7)：7342－7348.

[2] LIANG Y，REN Y，YU J，et al. Current trajectory image-based protection algorithm for transmission lines connected to MMC-HVDC stations using CA-CNN［J］. Protection and

Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 1 - 15.

[3] 赵政嘉, 李海波, 赵宇明, 等. 多类型分布式电源接入下的低压交流与直流配电网运行经济性对比[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 50 - 61.
ZHAO Zhengjia, LI Haibo, ZHAO Yuming, et al. Operational economic comparison of low voltage AC and DC distribution networks with multi-type distributed generation integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 50 - 61.

[4] LEE J Y, KIM H S, JUNG J H. Enhanced dual-active-bridge DC-DC converter for balancing bipolar voltage level of DC distribution system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(12): 10399 - 10409.

[5] LI B, WU X, KISH G J, et al. Dual 3L-NPC converter system with improved power quality for bipolar DC distribution[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(12): 16553 - 16565.

[6] 邓永坤, 马建军, 朱淼, 等. 双极直流配电系统中的单极故障重构:影响因素与重构方案[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(5): 1860 - 1873.
DENG Yongkun, MA Jianjun, ZHU Miao, et al. Monopolar fault reconfiguration in bipolar DC distribution system: influence factors and reconfiguration scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(5): 1860 - 1873.

[7] ZHAO S, CHEN Y, CUI S, et al. Modular multilevel DC-DC converter with inherent bipolar operation capability for resilient bipolar MVDC grids[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2022, 7(1): 37 - 48.

[8] YU J, ZHANG Z, XU Z. An active DC fault current limiting control for half-bridge modular multilevel converter based on arm voltage reconstruction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(1): 565 - 577.

[9] NI B, XIANG W, ZHOU M, et al. An adaptive fault current limiting control for MMC and its application in DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 920 - 931.

[10] 何东, 甘贝贝, 袁英硕, 等. 基于限流电抗器暂态电压余弦相似度的直流配电网纵联保护方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(12): 1 - 9,18.
HE Dong, GAN Beibei, YUAN Yingshuo, et al. Pilot protection method for DC distribution networks based on transient voltage cosine similarity of current-limiting reactor [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(12): 1 - 9,18.

[11] 吴轲, 郭约法, 梁伟锋, 等. 基于MMC直流阻抗重塑的直流故障限流控制策略[J]. 南方电网技术, 2022, 16(9): 8 - 17.
WU Ke, GUO Yuefa, LIANG Weifeng, et al. DC fault current limiting control strategy based on DC impedance remodeling of MMC[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(9): 8 - 17.

[12] LACERDA V A, MONARO R M, PEÑA-ALZOLA R, et al. Control-based fault current limiter for modular multilevel voltage-source converters[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020(118): 105750.

[13] JIANG Q, TAO Y, LI B, et al. Joint limiting control strategy based on virtual impedance shaping for suppressing DC fault current and arm current in MMC-HVDC systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(6): 2003 - 2014.

[14] 宋国兵, 王婷, 张保会, 等. 利用电力电子装置的探测式故障识别技术分析与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 173 - 183.
SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Baohui, et al. Analysis and prospect of detective fault identification technologies using power electronic device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 173 - 183.

[15] 陈少宇, 黄文焘, 邰能灵, 等. 基于单端暂态电压的含限流电抗器直流配电网保护方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 185 - 193.
CHEN Shaoyu, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Protection method based on single-terminal transient voltage for DC distribution network with current limiting reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 185 - 193.

[16] KIM J S, LEE E C, YUN S Y. Protection system for LVDC distribution networks using a fault current-limiting converter and protection zones[J]. IEEE Access, 2023(11): 75555 - 75572.

[17] NOUGAIN V, MISHRA S. Current-limiting reactors based time-domain fault location for high-voltage DC systems with hybrid transmission corridors [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023(72): 3507010.

[18] 张帆, 许建中, 苑宾, 等. 基于虚拟阻抗的MMC交、直流侧故障过电流抑制方法[J]. 中国电机工程报, 2016, 36(8): 2103 - 2113.
ZHANG Fan, XU Jianzhong, YUAN Bin, et al. Over current suppression control for AC and DC faults of modular multilevel converters based on virtual impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2103 - 2113.

[19] 卓超然, 张笑天, 张雄, 等. 支撑电容可分离的直流变压器短路故障电流限流控制方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(2): 424 - 432.
ZHUO Chaoran, ZHANG Xiaotian, ZHANG Xiong, et al. Short-circuit fault current limiting control method of DC transformer with separable supporting capacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 424 - 432.

[20] 郑涛, 朴勇, 郭勇帆, 等. 直流变压器输出侧双极短路故障下的故障穿越方法[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3115 - 3122.
ZHENG Tao, PIAO Yong, GUO Yongfan, et al. Fault ride-through of bipolar short-circuit fault on output side of DC transformer[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3115 - 3122.

[21] QI H, CHEN W, DOU Z, et al. Fault characteristic analysis and a novel pilot protection scheme for pole-to-ground fault in flexible DC distribution network[J]. IEEE Access, 2023(11): 74071 - 74087.

[22] 郑涛, 郭勇帆, 吕文轩, 等. 基于电力电子变压器故障穿越策略的低压直流配电网保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(16): 152 - 161.
ZHENG Tao, GUO Yongfan, LÜ Wenxuan, et al. Protection for low-voltage DC distribution network based on fault ride-through strategy of power electronic transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 152 - 161.

[23] LI C, RAKHRA P, NORMAN P J, et al. Multi-Sample differential protection scheme in DC microgrids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(3): 2560 - 2573.

[24] SHABANI A, MAZLUMI K. Evaluation of a communication assisted overcurrent protection scheme for photovoltaic-based DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11

(1)：429－439.
[25] NIU C，DOU Z，DONG L，et al. Modified isolated modular multilevel converter for bipolar DC distribution system[C]// 2023 IEEE International Conference on Advanced Power System Automation and Protection（APAP），October 08－12，2023，Xuchang，China. New York：IEEE，2023：432－438.
[26] 韩杰祥，张哲，冉启胜，等. 低压直流配电网主动限流控制及保护方案[J]. 电力系统自动化，2022，46(9)：182－190.
HAN Jiexiang，ZHANG Zhe，RAN Qisheng，et al. Active current-limiting control and protection scheme for low-voltage DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems，2022，46(9)：182－190.
[27] 李晓庆，张培超，祝炜昊，等. 基于灵敏度的光储直流配电网电压/网损自适应优化协调控制[J]. 电力建设，2024，45(7)：88－99.
LI Xiaoqing，ZHANG Peichao，ZHU Weihao，et al. Sensitivity-based adaptive voltage/network loss-coordinated optimal control in photovoltaic-storage DC distribution systems[J]. Electric Power Construction，2024，45(7)：88－99.
[28] 张健宝，王磊，江伟建. 基于VMD和Duffing振子算法的配电网差动保护[J]. 中国电力，2024，57(11)：26－35.
ZHANG Jianbao，WANG Lei，JIANG Weijian. Differential protection of distribution network based on VMD and duffing oscillator[J]. Electric Power，2024，57(11)：26－35.

收稿日期：2024-09-18；**网络首发日期**：2026-03-19

作者简介：

董亮辉(1987)，男，硕士生导师，博士，研究方向为电力电子变换技术、电机驱动控制、电机系统的故障诊断和容错控制，dlh@zzu. edu. cn；

侯星宇(2000)，男，硕士研究生，研究方向为低压直流配电网故障分析与保护，houxingyu999@163. com。

赖锦木(1990)，男，通信作者，副教授，博士，研究方向为电力电子和人工智能技术在电力系统中的应用、柔性变压器，交直流配电网故障分析与保护，laijinmu@whut. edu. cn。

广　告

中兴通讯股份有限公司…… 封二
荣信汇科电气股份有限公司 …… 封三
平高集团(河南)电力器材科技有限公司…… 封底
中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司 …… A1
佛山电力设计院有限公司…… A2−A3
中国能源建设集团广东火电工程有限公司…… A4−A5
杭州海兴电力科技股份有限公司…… A6−A7
云南电网有限责任公司电力科学研究院…… A8
广东恩蓄成数智创新科技有限公司…… A9
广州麦科凌电力装备有限公司…… A10
南方电网电力科技股份有限公司…… A11
正泰电气股份有限公司…… A12
中电普瑞电力工程有限公司…… A13
长园深瑞继保自动化有限公司…… A14
河南平高电气股份有限公司…… A16

征 稿 启 事

《南方电网技术》是由中国南方电网有限责任公司主管、南方电网科学研究院有限责任公司主办的电力技术类科技期刊，向国内外公开发行。刊登电力系统的科研、规划、设计、工程、生产运行、设备和系统维护等方面的成果、经验和动态，尤其是科研创新方面的论文。设有特约专稿、高压直流输电、高电压与绝缘、系统分析与运行、控制与保护、调度与通信、输变电技术、电力技术经济、智能电网、分布式电源与微电网、低碳电力等栏目。热烈欢迎国内外的电力研究人员、工程技术人员、大专院校师生踊跃投稿。

1 文稿要求

1）文稿应未在其他刊物上发表过，译文稿件须附上原作者的书面许可证明。内容要有科学性、创新性和实用性；论点明确、数据可靠、说理严谨、数学推导简明；语言流畅、文字简练、层次分明、重点突出。

2）学术论文请按 GB/T 7713.2—2022《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》书写，篇幅以版面不超过 9 000 字（包括图表所占篇幅）为宜。同时请写明如下 a，b，c，d，e 五项：

a）作者署名（不宜超过 7 位）、作者单位、地址、电话、email 信箱和邮政编码；

b）论文题目和作者单位英译文，作者姓名的汉语拼音；

c）作者的简历，包括姓名、出生年、性别、籍贯、职称、学位、当前从事的研究或工作等项；

d）350 字左右的中文摘要，3～8 个关键词，以及摘要和关键词相应的英文文本。摘要采用第三人称写法，内容包括论文的目的、方法、结果和结论；

e）若为国家基金资助项目或部、省级重大科研攻关项目，请提供项目名称及编号。

2 书写格式

1）要求文稿正文字号为 5 号，汉字字体为宋体，英数字体为 Times New Roman，希腊字体为 Symbol。文稿须采用可编辑的电子文档形式。

2）计量单位采用国家法定计量单位和符号，不能用“大气压”、“kgf/cm^2”、“卡”、“ppm”等已废除的计量单位。

3）文中和公式中容易混淆的字符请注清文种（希文、英文、罗马字等）、大小写、上下标及上下标字母含义，表示矢量及矩阵的字符用黑斜体表示或特别注明。

4）文稿标题中不宜用缩略词（化学符号和公知公用者除外）；摘要和正文中的缩略词在第一次出现时都必须写出全称，后加括号附缩略词。

3 表格、插图及参考文献

1）表格尽量采用“三线表”。表格的上方写表序和表名。表名应有自明性且中文、英文表名并列。表注放在表底，缩入 1 个汉字以“注：”起头排版。

2）插图的下方应有图序和图名。图名应有自明性且中英文图名并列。工程图、电气图和函数图采用 AutoCAD、Adobe Illustrator 或 Corel DRAW 软件绘制，工程图和电气图要符合国家标准规定，函数图要标明曲线序号及其注释，坐标轴上要有标值、标目，注明物理量和单位；数码照片图具备 200 万总像素以上。

3）图片和表格中的文字、变量、单位和数字要齐全、清晰。

4）参考文献应选用公开发表的资料，按引用的先后次序列表于文后，以[1]、[2]…标识序号，且与正文中的指示序号一致。按《信息与文献　参考文献著录规则，GB/T 7714—2015》和《中国学术期刊（光盘版）检索与评价数据规范，CAJ-CD B/T 1—2006 修订版试行稿》的要求著录文后参考文献。中文参考文献后要并列其英文译文（如示例[6]所示）。

文献类型及其标识为：普通图书[M]；会议论文[C]；报纸文章[N]；期刊文章[J]；学位论文[D]；报告[R]；标准[S]；专利[P]；汇编[G]；档案[B]；古籍[O]；参考工具[K]；其他未说明的文献类型，例如可公开的政府行政部门编号文件、行业或大公司的技术规范或工作手册[Z]。网上期刊[J/OL]；网上电子公告[EB/OL]。电子文献尚需在载体标记后加上发表或更新日期（加圆括号）、引用日期（加方括号）和电子文献网址。

4 投稿

1）请登录《南方电网技术》编辑部网站 https://nfdwjs.csg.cn，选择“作者登录”，登录或注册登录后选择投稿并按提示操作，登录方面出现问题请致电 020-36625646 咨询。

2）投稿时务必附上联系电话（手机为佳）。

3）编辑部不保证留存稿件，请作者自留底稿。稿件评审进程和结论可在《南方电网技术》编辑部网站上即时查询。作者也可致电 020-36625642、36625643 或发送电子邮件到 nfdwjs@csg.cn 向编辑部了解审稿情况。

4）文章一经发表，编辑部便取得作者的自动授权，可将文章收录入本刊网站，及与本刊有合作关系的数据库。

参考文献著录格式示例：

[1] 刘国钧，陈绍业，王凤翥. 图书馆目录[M]. 北京：高等教育出版社，1957：15-18.

[2] 钟文发. 非线性规划在可燃毒物配置中的应用[C]//赵玮. 运筹学的理论与应用——中国运筹学会第五届大会论文集. 西安：西安电子科技大学出版社，1996：468-471.

[3] 冯西桥. 核反应堆压力管道与压力容器的 LBB 分析[R]. 北京：清华大学核能技术设计研究院，1997.

[4] 中国国家标准化管理委员会. 信息与文献 参考文献著录规则：GB/T 7714—2015[S]. 北京：中国标准出版社，2015.

[5] 邓一刚. 全智能节电器：200610171314.3[P]. 2006-12-13.

[6] 陈祥. 无线技术在现代电网管理中的应用与展望[J]. 南方电网技术，2009，3(6)：85-89.
CHEN Xiang. Development of wireless technology in modern power grid management and its perspective [J]. Southern Power System Technology，2009，3(6)：85-89.

[7] 王明亮. 关于中国学术期刊标准化数据库系统工程的进展[EB/OL]. (1998-08-16)[1998-10-04]. http://www.cajcd.edu.cn/pub/wml.txt/980810-2.html.

《南方电网技术》编辑部