

柔直送出下光伏送端电网交流送出线路的不对称故障距离保护方案

马红月¹, 李岩², 张涛¹, 曹润彬², 郑涛¹, 郝治国¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 2. 南方电网科学研究院, 广州 510663)

摘要: 柔直送出下大规模光伏送端电网的故障特征受双端电力电子设备的控制策略和系统拓扑形式影响显著, 传统继电保护的适应性受到挑战。综合考虑换流器的故障控制策略、送端电网的拓扑、变压器接线方式和故障位置, 从设备建模和系统建模两个方面建立了光伏送端电网交流送出线路的故障等值模型。通过分析系统的复合序网, 提取了不对称故障下线路的差流特征和故障距离阻抗特征。基于柔直侧的故障特征, 提出了光伏送端电网的不对称故障距离保护方案: 对于接地短路故障, 利用序分量特征计算故障距离阻抗, 在原理上不受过渡电阻影响; 对于不接地短路故障, 基于阻抗复平面法利用故障相差流特征计算故障距离。PSCAD/EMTDC 仿真结果表明, 该方案仅利用了柔直侧的单端量信息, 能够准确计算故障距离阻抗, 可靠地区分区内、区外故障, 提高了双端弱馈场景中距离保护的耐受过渡电阻能力。

关键词: 光伏送端电网; 控制策略; 故障特征; 距离保护; 过渡电阻

Asymmetric Fault Distance Protection for AC Transmission Lines of PV Sending-End Grid Under VSC-HVDC

MA Hongyue¹, LI Yan², ZHANG Tao¹, CAO Runbin², ZHENG Tao¹, HAO Zhiguo¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The fault characteristics of large-scale photovoltaic (PV) sending-end grid under VSC-HVDC are significantly affected by the control strategy and system topology form of double-end power electronic equipment, and the adaptability of traditional relay protection is challenged. Considering the fault control strategy of the converter, the topology of the sending-end grid, the transformer wiring mode and the fault location, a fault-equivalent model of the AC transmission line of the PV sending-end grid in terms of both equipment modeling and system modeling is established. By analyzing the composite sequential network of the system, the differential current characteristics of asymmetrical faults and fault distance impedance characteristics are extracted. Based on the fault characteristics of the VSC-HVDC side, asymmetric fault distance protection schemes for PV sending-end grid are proposed. For the distance protection scheme of grounded short-circuit fault, the fault distance impedance is calculated by using the sequential component characteristics, which is not affected by the transition resistance in principle. For the distance protection scheme of the ungrounded short-circuit fault, the fault distance is calculated based on the impedance complex-plane method by utilizing the fault-phase differential-current characteristics. Based on the simulation results of PSCAD/EMTDC, the proposed schemes can accurately calculate the fault distance impedance by utilizing only the single-ended quantity information of the VSC-HVDC side, reliably distinguish between internal and external faults, and improve the ability of the distance protection to tolerate the transition resistance in the double-ended weak-feeding scenario.

Key words: PV sending-end grid; control strategy; fault characteristics; distance protection; transition resistance

0 引言

随着新型电力系统的发展,我国将在“十四五”期间建成多个大型新能源基地^[1]。基于电压源型换流器的柔性直流输电可实现送端电网电压和频率的主动支撑^[2-3],成为偏远地区大规模新能源基地远距离外送的最佳方案^[4]。柔直送出下的大规模新能源送端电网中,在不同空间分布的电力电子设备控制作用下,系统的电源形态和故障特征将发生显著变化^[5-6],这将为传统保护的适应性带来挑战^[7]。

距离保护的保护范围和灵敏度不受系统运行方式的影响,一般基于线路的单端量信息,在交流送出线路主保护和后备保护中得到广泛应用^[8]。然而,传统距离保护在发生非金属性短路时,受过渡电阻影响,保护不正确动作的情况时有发生^[9-11]。因此,分析和研究柔直送出下大规模新能源送端电网的故障特性,提出适用于新场景的耐受过渡电阻能力强的距离保护方案对保障系统的安全稳定运行具有重要意义。

在电力电子化系统中,为提高距离保护的耐受过渡电阻能力,国内外的学者已做了大量研究。文献[12-13]通过自适应调整保护动作边界来自动调整动作区域,以提高距离保护对过渡电阻的耐受能力。然而,由于逆变型电源的可控性和弱馈特性^[14-16],现有的保护方案容易导致保护范围设置过大,外部故障可能会引起保护误动作。文献[17-18]基于阻抗复数平面的距离保护方案利用保护安装处的故障分量和序分量估算故障附加阻抗,进而求解计算实际故障位置,这类方案在多电压等级线路阻抗不一致的场景中会产生误差。基于功率平衡的距离保护方案是从能量的角度分析故障特征,文献[19]提出了一种基于距离和差动保护相结合的方法,利用输电线路两端的有功功率计算过渡电阻,由继电器直接从测量阻抗中消除其影响,以得到故障的准确位置,但这种方法需要通过即时通信获取线路双端的信息。文献[11]利用故障点电压、测量电流和整定阻抗构造虚拟测量电压,间接判断故障与动作边界的相对位置关系,提高了对过渡电阻的抗干扰性。

在大量新能源接入背景下,新能源故障响应的受控特性深刻改变了系统故障特征,传统保护的适

应性受到挑战。文献[7]考虑到新能源电源故障电流的弱馈特征,新能源侧的距离保护动作性能下降,提出了一种基于延时和零序阻抗的距离保护方案,利用系统侧距离保护切除故障,能够消除系统侧短路电流的影响,但该方案会增加故障切除时间,仅能作为后备保护。文献[20]基于风电机组和构网型柔直换流器的控制策略建立系统的等效序网模型,得出不对称故障下交流线路两侧短路电流必然存在相位差的结论,并且该场景中传统距离保护和差动保护性能下降。因此,目前的研究工作主要聚焦基于控保协同的保护方法。文献[21]考虑了风电场的负序电流抑制策略,分析得到故障线路两侧在单相接地故障下零序电流的受控特性,提出了基于零序电流分布特征的故障距离求解方案。文献[22]提出了基于正序故障分量电流抑制策略的工频变化量距离保护动作策略优化方案,消除了逆变电源输出正序故障分量电流给保护动作带来的不确定负面影响,该方案区分了区内外故障,具有较高的耐受过渡电阻能力。

对于新能源接入系统的输电线路距离保护研究已经开展了诸多工作,然而为了适应柔直送出下新能源送端电网的复杂场景,新型距离保护方案的制定需结合电力电子设备的控制策略进行设备建模和故障特征分析。

本文以柔直送出下光伏送端电网为研究场景,聚焦其交流送出线路的单相接地、两相短路、两相接地短路等3种不对称故障,开展故障特征与保护方案研究。建立了计及换流器控制策略的电力电子设备等值模型;提取了各种不对称短路情况下的故障相差流特征和故障距离阻抗特征;提出了光伏送端电网交流送出线路的不对称故障距离保护方案;最后在PSCAD/EMTDC仿真平台中验证了所提方案的有效性。

1 光伏送端电网拓扑及换流器等值模型

1.1 光伏送端电网拓扑

光伏电站经汇集后由交流送出线路并入柔直换流站构成光伏送端电网,在交流送出线路的 F 点发生不对称短路故障。由于本文研究柔直侧的单端量距离保护,为了简化分析,认为光伏电站的参数一致,将光伏侧电源采用聚合模型表示。系统的简化拓扑结构和换流器的控制结构如图1所示。

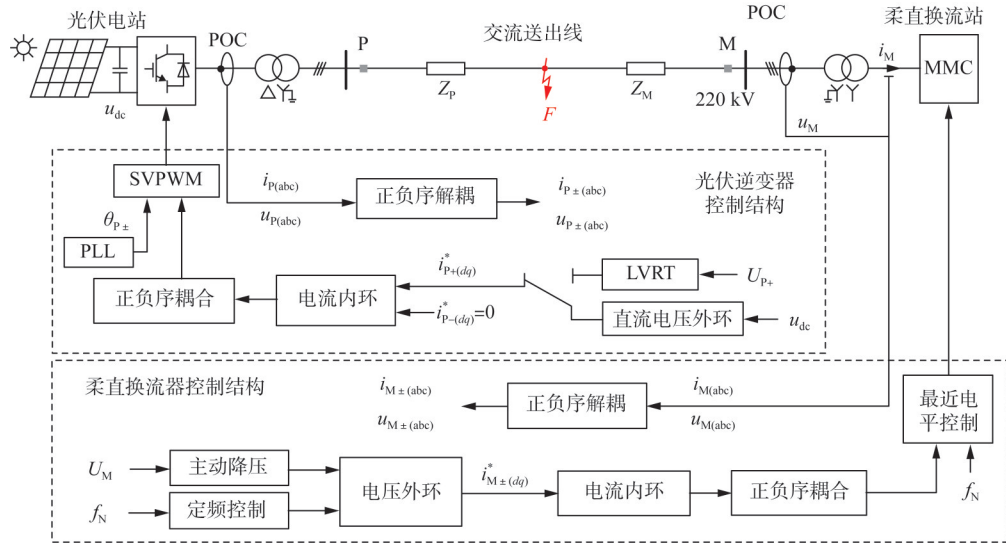


图 1 系统拓扑及换流器控制结构

Fig. 1 System topology and the converter's control structure

图中: 下标 P 和 M 分别代表光伏电站侧和柔直换流站侧; 光伏侧的升压变压器采用 Dyn 接线方式, 柔直侧采用 YNy 接线方式; 下标 +、-、0 分别代表正序、负序、零序, 下标 abc、dq 分别代表三相电气量及其 dq 轴分量; 上标*代表参考值; Z_N 和 Z_M 分别为交流送出线路故障点 F 两侧的阻抗。

光伏逆变器和柔直换流器均采用了正负序解耦控制, 其中光伏利用锁相环 (phase-locked-loop, PLL) 对连接点 (point-of-connection, POC) 的电压相位 θ_{p+} 进行跟踪, 采用空间矢量脉宽调制 (space vector pulse width modulation, SVPWM); 柔直换流器为构网型电源, 采用定频控制 ($f_N=50$ Hz) 和最近电平调制策略。

1.2 光伏逆变器的故障控制策略及等值建模

由于光伏逆变型电源采用负序电流抑制策略^[14], 稳态负序电流近似为 0, 负序网络中光伏侧视为开路。在低电压穿越 (low voltage ride-through, LVRT)^[15-16] 期间, 光伏侧输出电流 $\dot{I}_{p+}$ 直接受控于光伏逆变器 POC 的正序电压, 其电流参考值为:

$$\dot{I}_{p+}^* = \begin{cases} 0, & U_{p+} > 0.9 \text{ p.u.} \\ 1.5(0.9 - U_{p+})I_{PN}, & 0.2 \text{ p.u.} \leq U_{p+} \leq 0.9 \text{ p.u.} \\ I_{Pmax}, & U_{p+} < 0.2 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (1)$$

$$\dot{I}_{pd+}^* = \sqrt{I_{Pmax}^2 - (\dot{I}_{pq+}^*)^2} \quad (2)$$

式中: $\dot{I}_{pd+}^*$ 和 $\dot{I}_{pq+}^*$ 分别为光伏逆变器正序电流参考值

的 dq 轴分量; U_{p+} 为光伏逆变器 POC 正序电压幅值的标么值; I_{PN} 为光伏逆变器的正常运行时的额定电流; I_{Pmax} 为光伏逆变器能够承受的最大电流, 一般为额定电流的 1.2~1.5 倍。因此, 光伏逆变器的输出电流受限于设备耐受的最大电流, 在故障期间可被等值为正序受控电流源^[20], 其稳态等值模型为:

$$\begin{cases} I_{p+} = \sqrt{(\dot{I}_{pd+}^*)^2 + (\dot{I}_{pq+}^*)^2} \\ \theta_{pi+} = \arctan\left(\frac{\dot{I}_{pq+}^*}{\dot{I}_{pd+}^*}\right) + \theta_{p+} \\ \dot{I}_{p+} = I_{p+} \angle \theta_{pi+} \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_{p+} 和 θ_{pi+} 分别为光伏侧输出的正序电流的幅值和相位; θ_{p+} 为光伏逆变器 POC 正序电压的相位。

1.3 柔直换流器的故障控制策略等值建模

柔直换流器在正常运行期间采用定频控制 (工频), 电压外环采用定电压控制和负序电压抑制控制。在故障期间, 电压外环开环运行, 其积分环节闭锁, 因此柔直换流器呈现出电流源特性^[3]。此时, 电压外环的控制方程为:

$$\begin{cases} \dot{I}_{Md+}^* = K_{MP}(u_{Md+}^* - u_{Md+}) \\ \dot{I}_{Mq+}^* = K_{MP}(u_{Mq+}^* - u_{Mq+}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\dot{I}_{Md+}^*$ 和 $\dot{I}_{Mq+}^*$ 分别为柔直换流器正序/负序电流参考值的 dq 轴分量; K_{MP} 为电压外环的比例参数; u_{Md+} 和 u_{Mq+} 分别为柔直换流器正序/负序电压的 dq 轴分量; 电压参考值 u_{Md+}^* 和 u_{Mq+}^* 表示为:

$$\begin{cases} u_{Md+}^* = U_{Mrated} - K_V \sqrt{u_{Md-}^2 + u_{Mq-}^2} \\ u_{Mq+}^* = u_{Md-}^* = u_{Mq-}^* = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: U_{Mrated} 为柔直换流器 POC 电压的额定值; K_V 为降压比例系数。

因此, 柔直换流器输出的正序电流 i_{M+} 同时受控于 POC 的正序电压和负序电压, 负序电流 i_{M-} 仅与 POC 的负序电压幅值呈正相关, 其稳态等值模型为:

$$\begin{cases} I_{M+} = K_{MP} \sqrt{(U_{Mrated} - K_V U_{M-} - u_{Md+})^2 + u_{Mq+}^2} \\ \theta_{Mi+} = -\arctan\left(\frac{u_{Mq+}}{U_{Mrated} - K_V U_{M-} - u_{Md+}}\right) \\ i_{M+} = I_{M+} \angle \theta_{Mi+} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} I_{M-} = K_{MP} U_{M-} \\ \theta_{Mi-} = \arctan\left(\frac{u_{Mq-}}{u_{Md-}}\right) \\ i_{M-} = I_{M-} \angle \theta_{Mi-} \end{cases} \quad (7)$$

式中: U_{M-} 为柔直换流器 POC 负序电压幅值, $U_{M-} = \sqrt{u_{Md-}^2 + u_{Mq-}^2}$; $I_{M\pm}$ 和 $\theta_{Mi\pm}$ 分别为柔直换流器输出正序/负序电流的幅值和相位。

由前文可知, 当不对称故障发生时, 负序电压抑制策略将导致柔直换流器输出较大的负序电流, 因此在负序电压外环需设置负序电流参考值限幅控制, 此时的负序电流 i_{M-} 为:

$$i_{M-} = I_{Mmax} \angle \theta_{Mi-} \quad (8)$$

式中 I_{Mmax} 为柔直换流器负序电流的最大允许值。

从光伏逆变器和柔直换流器在故障期间的稳态等值模型可以看出, 其输出电流均受限于设备的最大耐受电流。因此, 当光伏送端电网的交流线路发生故障时, 故障点两侧换流器提供的短路电流受限, 呈现出双端弱馈的故障特征。

2 光伏送端电网的复合序网模型和故障特征分析

2.1 单相接地短路

在图 1 交流送出线路的 F 处发生单相(A相)接地短路时, 系统的复合序网如图 2 所示。图中 R_F 为故障过渡电阻。

由于系统的零序网络拓扑与变压器的接地方式和故障类型有关。柔直侧变压器采用 YNy 型接线方式, 其励磁电抗较大, 导致柔直侧的零序电流几乎

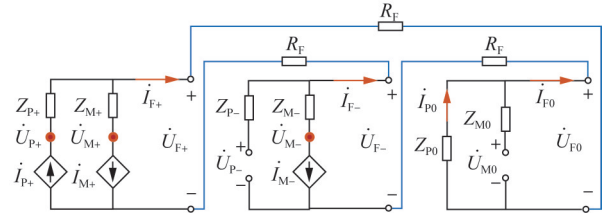


图 2 单相接地短路的复合序网

Fig. 2 Composite sequence network under single-phase grounding fault

为 0。因此, 在零序网络中认为柔直侧开路, 故障点处零序电流主要为光伏侧的零序电流。结合单相接地短路的边界条件可以得出:

$$i_{F0} = i_{P0} = -i_{M-} \quad (9)$$

式中: i_{F0} 为故障点的零序电流; i_{P0} 为光伏侧的零序电流。因此, 单相接地短路的零序电流呈现受控特征。

由式(9)可知, 单相接地短路的故障点电流 i_F 可以表示为:

$$i_F = i_{F+} + i_{F-} + i_{F0} = -3i_{M-} \quad (10)$$

式中 i_{F+} 和 i_{F-} 分别为故障点的正序电流和负序电流。结合图 2 的序网模型, 故障点的各序电流为:

$$\begin{cases} i_{F+} = i_{P+} - i_{M+} \\ i_{F-} = -i_{M-} \\ i_{F0} = i_{P0} \end{cases} \quad (11)$$

定义电流正方向为从光伏侧指向柔直侧, 因此故障相差流与故障点电流相同, 结合式(11), 故障相的差电流 Δi_A 为:

$$\Delta i_A = i_F = i_{P+} + i_{P0} - (i_{M+} + i_{M-}) = -3i_{M-} \quad (12)$$

式(12)表明, 故障相的差电流幅值为 3 倍的柔直侧负序电流幅值, 二者的相位差为 180° 。

结合零序网络, 单相接地短路的故障距离阻抗为:

$$Z_{M0} = Z_{S0} - \frac{U_{M0}}{i_{M-}} \quad (13)$$

式中: Z_{M0} 为柔直侧交流送出线路的零序阻抗; Z_{S0} 为交流送出线路和变压器的零序阻抗之和。可以看出, 仅通过柔直侧电流和电压的序分量即可推测出故障距离阻抗, 且不受过渡电阻的影响。

2.2 两相接地短路

在图 1 交流送出线路的 F 处发生两相(A、B相)接地短路时, 系统的复合序网如图 3 所示。

两相接地短路的边界条件为:

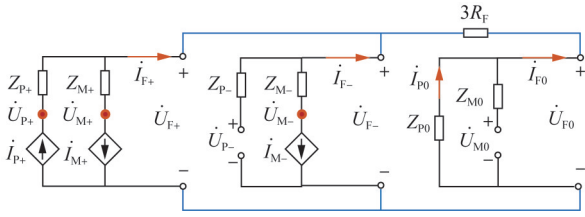


图 3 两相接地短路的复合序网

Fig. 3 Composite sequence network under double-phase grounding fault

$$\begin{cases} i_{F+} - i_{M+} - i_{M-} = -i_{F0} \\ \dot{U}_{F+} = \dot{U}_{F-} = \dot{U}_{F0} - 3R_F i_{F0} \end{cases} \quad (14)$$

式中 $\dot{U}_{F+}$ 、 $\dot{U}_{F-}$ 和 $\dot{U}_{F0}$ 分别为故障点的正序、负序和零序电压。

在系统的正序网络和负序网络中, 柔直侧的正序和负序电压为:

$$\begin{cases} \dot{U}_{M+} = \dot{U}_{F+} - Z_{M+} i_{M+} \\ \dot{U}_{M-} = \dot{U}_{F-} - Z_{M-} i_{M-} \end{cases} \quad (15)$$

考虑到线路的正序阻抗和负序阻抗相等, 可以推导出两相接地短路的故障距离阻抗:

$$Z_M = -\frac{\dot{U}_{M+} - \dot{U}_{M-}}{i_{M+} - i_{M-}} \quad (16)$$

可以看出, 当线路发生两相接地短路时, 基于柔直侧序分量的故障距离阻抗不受过渡电阻的影响。

2.3 两相短路

在图 1 交流送出线路的 F 处发生两相(A、B 相)短路时, 系统的复合序网如图 4 所示。

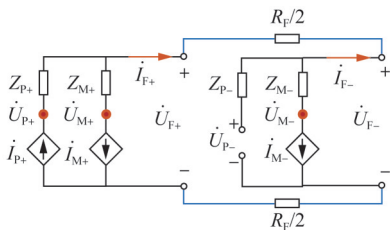


图 4 两相短路的复合序网

Fig. 4 Composite sequence network under phase-phase short circuit fault

两相短路的边界条件为:

$$\begin{cases} i_{F+} = i_{M+} + i_{M-} \\ \dot{U}_{F+} - \dot{U}_{F-} = R_F i_{M-} \end{cases} \quad (17)$$

结合式(12), 故障相 A 相的差电流为:

$$\begin{aligned} \Delta i_A &= i_{AP+} - (i_{AM+} + i_{AM-}) \\ &= i_{P+} \angle -120^\circ - (i_{M+} \angle -120^\circ + i_{M-} \angle -120^\circ) \\ &= i_{M+} \angle -120^\circ + i_{M-} \angle -120^\circ - i_{M+} \angle -120^\circ - i_{M-} \angle -120^\circ \\ &= -j\sqrt{3} i_{M-} = \sqrt{3} i_{AM-} \angle 150^\circ \end{aligned} \quad (18)$$

因此, 两相短路的故障相差电流幅值为 $\sqrt{3}$ 倍的柔直侧负序电流幅值, 二者的相位差为 150° 。

两相短路的故障距离阻抗受过渡电阻影响, 可在阻抗复平面上推导出故障距离^[23-24]。

综上所述, 当交流送出线路发生不对称短路故障时, 故障特征总结如下。

1) 单相接地短路故障的系统零序电流受控于柔直换流器输出的负序电流。故障相差流幅值为柔直侧负序电流幅值的 3 倍, 相位差约 180° 。根据零序网络推导的故障距离阻抗不受过渡电阻的影响。

2) 两相接地故障的故障距离阻抗仅通过柔直交流侧的电压和电流序分量即可得出, 且不受过渡电阻影响。

3) 两相短路故障的故障相差流幅值为柔直侧负序电流幅值的 $\sqrt{3}$ 倍, 相位相差约 150° 。

3 不对称故障距离保护方案

3.1 保护判据

以测量阻抗小于设定值作为保护判据:

$$|Z_M| \leq |Z_{set}| = K_{rel} |Z_L| \quad (19)$$

式中: $|Z_{set}|$ 为设定阻抗的幅值; $|Z_L|$ 为被保护线路的正序阻抗幅值; K_{rel} 为可靠系数。由于距离保护为欠量保护, 可靠系数通常取 0.8~0.85。

3.2 保护启动与故障类型判别

在系统正常运行时, 节点电压三相对称仅由正序分量构成。不对称故障发生后, POC 电压迅速降低, 电压的不对称分量增大, 以负序电压变化信号 ΔU_{p-} 启动不对称故障的保护:

$$\Delta U_{p-} > \varepsilon_- \quad (20)$$

式中 ε_- 为不对称故障的保护启动阈值, 实际工程应用中可根据电压等级、测量装置的误差等要求进行调整。

在如图 1 所示的系统中, 由于柔直侧变压器采用 YNy 型接线方式, 柔直侧的零序电流在正常运行

和各种短路情况下均接近为 0。因此,传统以测量点的零序电流分量判定故障类型的判据并不适用。本文根据柔直侧电压中是否含有零序分量判定故障为接地短路还是不接地短路。

3.3 基于柔直侧序分量特征的接地短路故障距离保护方案

根据第 3.2 节提取的故障距离阻抗特征,由式 (13)和(16),接地短路的故障距离阻抗由柔直侧的电压和电流的序分量计算得出,所需测量的电气量如表 1 所示。

表 1 不同接地短路故障距离阻抗及所需测量电气量

Tab. 1 Distance impedance of different grounding short-circuit faults and required electrical quantities

故障类型	故障距离阻抗	测量电气量
单相接地短路	$Z_{\Sigma 0} - \frac{\dot{U}_{M0}}{\dot{I}_{M-}}$	$\dot{U}_{M0} \dot{I}_{M-}$
两相接地短路	$-\frac{\dot{U}_{M+} - \dot{U}_{M-}}{\dot{I}_{M+} - \dot{I}_{M-}}$	$\dot{U}_{M+} \dot{I}_{M+}$ $\dot{U}_{M-} \dot{I}_{M-}$

3.4 基于柔直侧故障相差流特征的相间短路故障距离保护方案

以 AB 两相短路为例,其故障的电路如图 5 所示。

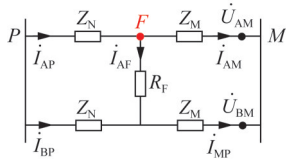


图 5 AB 两相短路故障的电路图

Fig. 5 Circuit diagram for AB two-phase short-circuit fault

图 5 中柔直侧测量点 M 的相间阻抗继电器的测量阻抗表示为:

$$\begin{aligned} Z_{ABM} &= \frac{\dot{U}_{AM} - \dot{U}_{BM}}{-\dot{I}_{AM} + \dot{I}_{BM}} \\ &= Z_M + R_F \frac{\dot{I}_{AF}}{-\dot{I}_{AM} + \dot{I}_{BM}} \end{aligned} \quad (21)$$

式中: $\dot{U}_{AM}$ 和 $\dot{U}_{BM}$ 分别为测量点 M 处的 A 相和 B 相电压; $\dot{I}_{AM}$ 和 $\dot{I}_{BM}$ 分别为测量点 M 处的 A 相和 B 相电流。

由 AB 两相短路的故障相差流特征可知,故障电流为

$$\dot{I}_{AF} = \sqrt{3} \dot{I}_{AM} \angle 150^\circ = \sqrt{3} \dot{I}_{M-} \angle -90^\circ \quad (22)$$

因此,当新能源采用负序电流抑制策略、柔直换流器采用负序电流注入控制时,送出线路发生 AB 两相短路的故障位置阻抗幅值^[23]表示为:

$$|Z_M| = \left| \frac{\dot{U}_{AM} - \dot{U}_{BM}}{-\dot{I}_{AM} + \dot{I}_{BM}} \right| \frac{\sin(\varphi_M - \varphi_\Delta)}{\sin(\varphi_L - \varphi_\Delta)} \quad (23)$$

式中: φ_L 为输电线路阻抗角;测量阻抗相角 φ_M 和附加阻抗相角 φ_Δ 为:

$$\varphi_M = \arg \left(\frac{\dot{U}_{AM} - \dot{U}_{BM}}{-\dot{I}_{AM} + \dot{I}_{BM}} \right) \quad (24)$$

$$\varphi_\Delta = \arg \left(\frac{\dot{I}_{M-}}{-\dot{I}_{AM} + \dot{I}_{BM}} \right) - 90^\circ \quad (25)$$

3.5 保护实施流程

当故障发生时,由保护装置测量到的负序电压分量启动保护;若检测到电压中存在零序分量,则判定为接地短路故障,否则判定为不接地短路故障;以相电流差突变量区分单相接地短路和两相接地短路^[25];按照故障类型选择对应的公式计算故障距离;根据距离保护动作判据判定区内、外故障。保护的实施流程如图 6 所示。

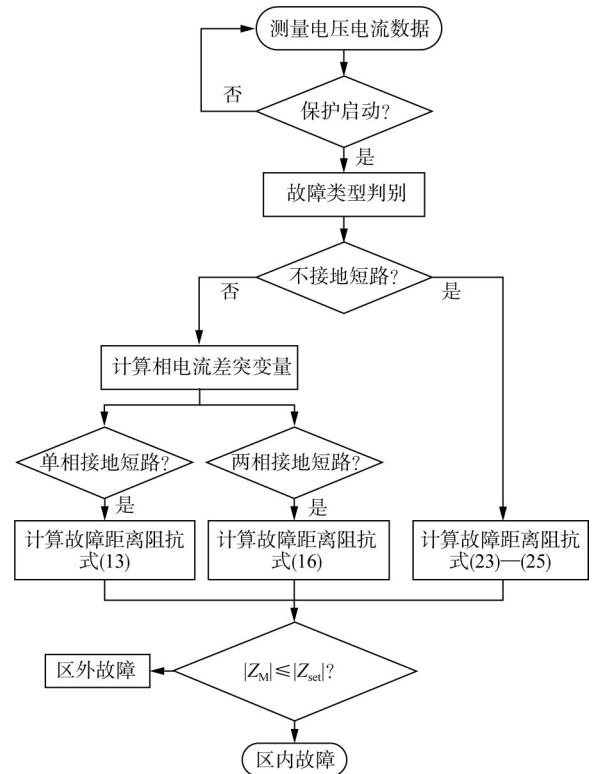


图 6 保护实施流程图

Fig. 6 Protection implementation flowchart

4 仿真验证

在 PSCAD 中搭建如图 1 所示的仿真模型, 算例参数如表 2 所示。

表 2 算例参数

Tab. 2 Parameters of the example

	名称	取值
交流送出系统参数	额定功率/MVA	150
	额定频率/Hz	50
	额定电压/kV	220
	线路正/负序阻抗	$0.0178+j0.314\ \Omega/\text{km}$
	线路零序阻抗	$0.158+j1.58\ \Omega/\text{km}$
	送出线路长度/km	60
光伏逆变器 关键参数	电流环比例系数	2
	电流环积分系数	50
	锁相环比例系数	50
	锁相环积分系数	900
	正序电流补偿系数	1.5
	单机容量/MVA	0.25
	聚合台数	600
光伏侧 升压变压器	容量/MVA	200
	漏抗	0.0025
柔直换流器 关键参数	电压外环降压比例系数	1
	电压外环比例系数	2
	电压外环积分系数	10
	电流内环比例系数	0.4
	电流内环积分系数	8
	负序电流限幅值/p. u.	0.5

光伏电站经汇集后经 220 kV 交流送出线路并入柔直换流站。系统正常运行至 1 s 时, 在交流送出线路 F 点发生不对称短路故障, 故障持续时间为 0.5 s。交流送出线路的正、负序阻抗为 $0.0178+j0.314\ \Omega/\text{km}$, 零序阻抗为 $0.158+j1.58\ \Omega/\text{km}$, 在距离柔直侧 M 点 10 km (0.2 p. u.)、40 km (0.8 p. u.)、55 km (1.1 p. u.) 的 F 点处发生不对称故障, 其中, 距离 M 点小于 50 km 的范围内发生短路对应区内故障, 大于 50 km 的短路对应区外故障。

4.1 最大过渡电阻下的故障距离测量阻抗

对于 220 kV 线路, 接地短路的最大过渡电阻约为 $100\ \Omega$, 相间短路的最大过渡电阻约为 $20\ \Omega$ ^[25]。考虑最大过渡电阻的情况, 设置接地短路过渡电阻为 $100\ \Omega$, 相间短路过渡电阻为 $20\ \Omega$, 在交流送出线路的不同位置上发生不对称故障时, 本文

所提方法的测量阻抗情况如图 7 所示。

由图 7 可知, 按照本文所提的距离保护方案, 在交流线路的不同位置发生区内、外故障时, 即使在过渡电阻最大的情况下, 测量阻抗均能有效反映故障距离, 距离保护均能可靠动作。

4.2 不同过渡电阻下的故障距离测量阻抗和误差分析

由 4.1 节可知, 在最大过渡电阻情况下不同位置发生故障时, 测量阻抗均能准确测量。然而, 故障距离阻抗的测量电气量一般为受控量, 在故障发生后存在一定的过渡过程。一般情况下, 220 kV 线路的距离保护为后备保护。因此, 本文选取故障发生后 80 ms 内的故障距离阻抗测量幅值进行误差分析。

4.2.1 单相接地短路故障

当单相接地短路故障经 $0\ \Omega$ 、 $10\ \Omega$ 、 $50\ \Omega$ 和 $100\ \Omega$ 的过渡电阻发生在距离 M 点 10 km (0.2 p. u.) 和 40 km (0.8 p. u.) 处时, 故障距离测量阻抗幅值和不同时间段的相对误差如图 8—9 所示。

对于单相接地短路故障, 利用柔直侧的零序电压和负序电流分量进行故障距离测量, 在原理上不受过渡电阻影响。由于单相接地短路的测量阻抗基于柔直侧的零序电流为 0 的假设条件, 因此其暂态过程的过渡时间较长, 相对误差较大。由图 8 可知, 在故障发生后的 4 个周波内, 测量阻抗仍存在一定波动, 但随着故障发展, 测量阻抗幅值逐渐接近实际值 (故障发生后 0.2 s 内, 如图 7(a) 所示)。由于被测量直接计算的是光伏侧的故障位置阻抗, 因此图 9 中线路末端的相对误差小于线路首端的相对误差。

4.2.2 两相接地短路故障

当两相接地短路故障经 $0\ \Omega$ 、 $10\ \Omega$ 、 $50\ \Omega$ 和 $100\ \Omega$ 的过渡电阻发生在距离 M 点 10 km (0.2 p. u.) 和 40 km (0.8 p. u.) 处时, 故障距离测量阻抗幅值和不同时间段的相对误差如图 10 和图 11 所示。

由上文可知, 两接地短路故障利用柔直侧的电压和电流的正、负序分量进行故障距离测量, 在原理上不受过渡电阻影响。然而, 由于被测电气量为 4 个受控序分量, 因此故障暂态期间的测量误差较大。由图 10 可知, 在故障发生后 30 ms 内能够计算出较准确的阻抗幅值。因此, 在图 11 中, 过渡电阻与相对误差的相关性很弱。在不同过渡电阻下均

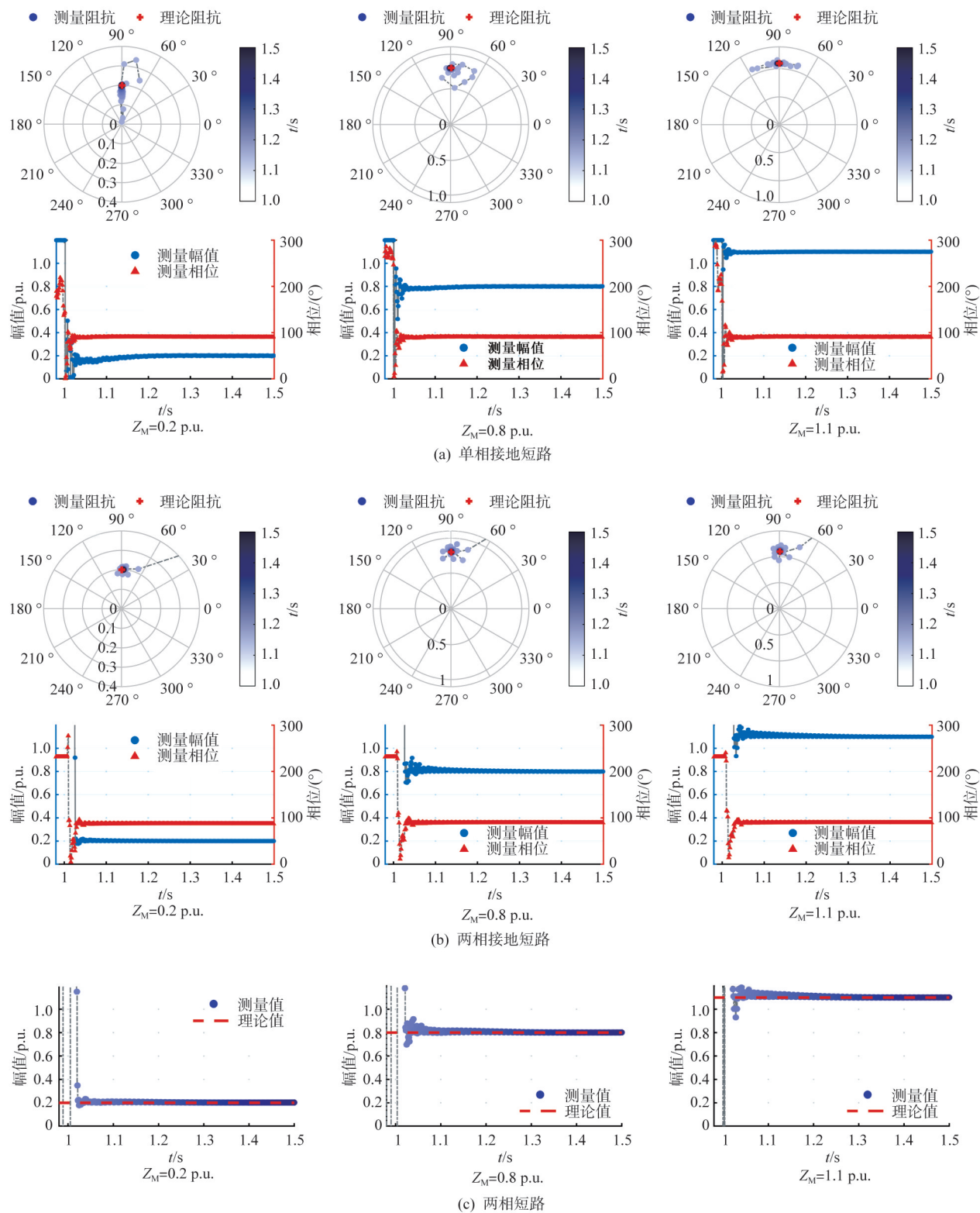


图7 最大过渡电阻下的故障距离测量阻抗

Fig. 7 Fault distance measurement impedances at maximum transition resistances

能有效反映故障位置。随着故障时间的推迟, 相对误差逐渐减小。

4.2.3 相间短路故障

当相间短路故障经 0Ω 、 2Ω 、 10Ω 和 20Ω 的

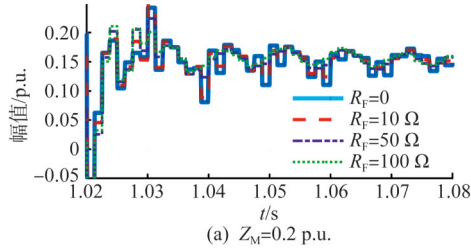
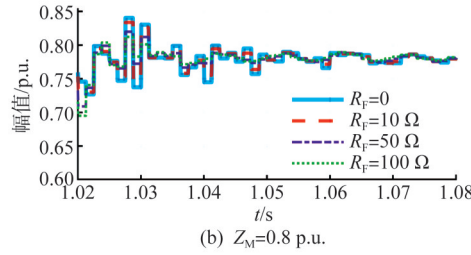
(a) $Z_M=0.2$ p.u.(b) $Z_M=0.8$ p.u.

图 8 单相接地短路的故障距离阻抗测量值

Fig. 8 Fault distance measurement for single-phase grounding short-circuit fault

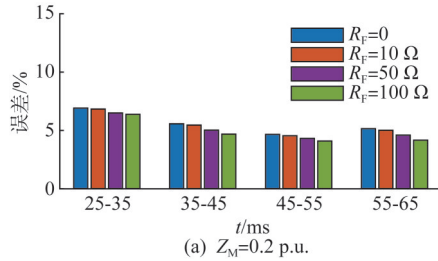
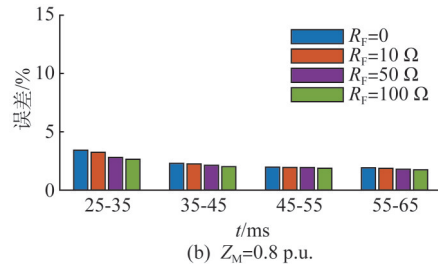
(a) $Z_M=0.2$ p.u.(b) $Z_M=0.8$ p.u.

图 9 单相接地短路的故障距离阻抗测量误差

Fig. 9 Fault distance measurement errors for single-phase grounding short-circuit fault

过渡电阻发生在距离 M 点 10 km (0.2 p.u.) 和 40 km (0.8 p.u.) 处时, 故障距离测量阻抗幅值和不同时段的相关误差如图 12—13 所示。

根据式 (23), 对于相间短路故障, 基于阻抗复平面和故障相差流的故障距离测量阻抗, 在原理上消除了过渡电阻的影响。由于相间短路的测量量中仅含有一个序分量, 故障阻抗测量值能够在短时间内 (1~2 个周波) 达到稳定。因此, 在不同过渡电阻下故障距离阻抗测量值的稳定性较好, 如图 12 所

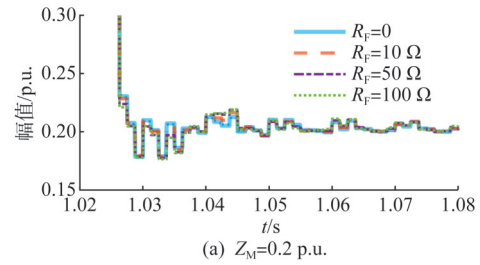
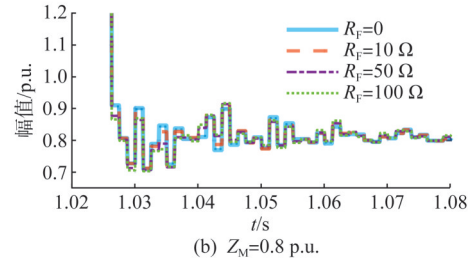
(a) $Z_M=0.2$ p.u.(b) $Z_M=0.8$ p.u.

图 10 两相接地短路的故障距离阻抗测量值

Fig. 10 Fault distance impedance measurement for double-phase grounding short-circuit fault

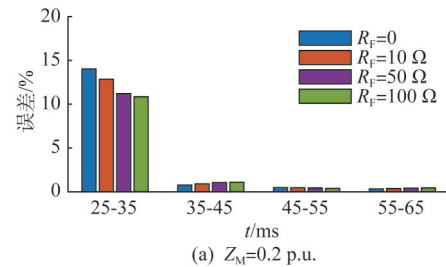
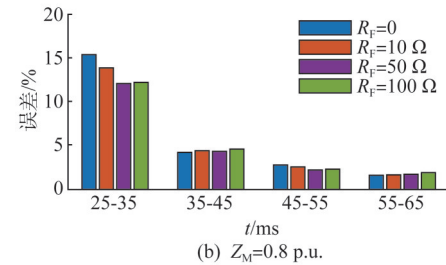
(a) $Z_M=0.2$ p.u.(b) $Z_M=0.8$ p.u.

图 11 两相接地短路的故障距离阻抗测量误差

Fig. 11 Fault distance measurement errors for double-phase grounding short-circuit fault

示。同时, 由图 13 可知, 当故障位置远离保护测量点时, 误差变大, 但仍能在一个周波后可靠动作。

综上所述, 本文提出的距离保护方案能够正确反映故障位置, 在各种工况下保护均能可靠动作, 具备较强的耐受过渡电阻能力。

此外, 表 3 为本文所提方法与现有保护方法的简要对比。结果表明, 所提出的保护方案基于换流器原本的故障控制策略, 不需要注入额外信号, 同

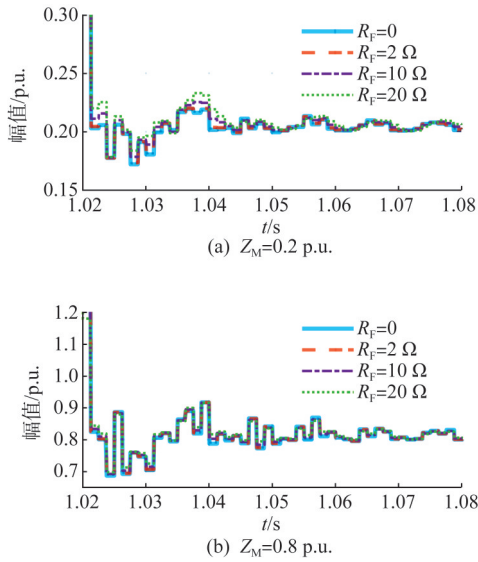


图 12 相间短路的故障距离阻抗测量值

Fig. 12 Fault distance impedance measurement for phase-phase short-circuit fault

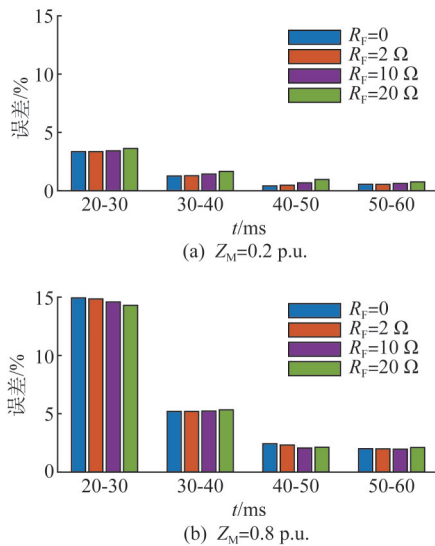


图 13 相间短路的故障距离阻抗测量误差

Fig. 13 Fault distance measurement error for the phase-phase short-circuit fault

时基于线路的单端测量信息，速动性较好，算法难度较低。

5 结论

本文针对柔直送出下的光伏送端电网，基于双端电力电子设备的故障控制策略和系统拓扑提出了不对称故障距离保护方案。结论如下。

1) 柔直送出下的光伏送端电网为典型的双端电力电子化系统，其交流侧的故障特征与换流器的

表 3 所提保护方法与现有保护方法的性能对比

Tab. 3 Performance comparison between the proposed protection and the existing protection methods

方法	注入信号	测量信息	动作时间/ms	算法难度
文献[26]	不需要	双端	<40	低
文献[27]	需要	单端	<40	适中
文献[7]	不需要	单端	>40	适中
文献[28]	不需要	单端	<40	高
本文方法	不需要	单端	<40	低

控制策略高度耦合；系统的序网模型由送端电网的拓扑、变压器接线方式和故障位置确定。

2) 本文考虑了双端电力电子设备的受控特征，建立了故障期间设备的故障等值模型；基于柔直侧的电压和电流序分量以及故障相差流特征提出的故障距离阻抗模型，从原理上消除了过渡电阻的影响。

3) 本文所提距离保护方案仅利用了柔直侧的电气量即可实时计算故障距离阻抗，提高了距离保护在双端弱馈场景中的适应性。

4) 仿真结果表明，利用本文所提方法在故障发生后的 1.5 个周波内距离保护的测量误差小于 15%，2 个周波后的测量误差小于 5%。故障距离阻抗测量结果能够准确反映故障位置，误差较小。

5) 本文依托新场景下的新特征构造新的保护原理。需要说明的是，本文提出的基于控保协同的保护原理基于所研究的特定场景，对于采用不同拓扑结构和不同换流器控制策略的新能源经柔直并网系统，其保护方案需进行具体分析与研究。

参考文献

- [1] 国家发展改革委, 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划 [EB/OL]. [2022 - 01 - 29]. https://www.nea.gov.cn/1310524241_16479412513081n.pdf.
- [2] 李冠群, 叶华, 宾子君. V/f 控制 MMC 带换流变压器空载充电发生高频振荡的机理分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47 (11): 50 - 59.
LI Guanqun, YE Hua, BIN Zijun. High-frequency oscillation mechanism analysis of V/f controlled modular multilevel converter charging with converter transformer under no-load condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47 (11): 50 - 59.
- [3] 蔡希鹏, 黄伟煌, 李桂源, 等. 大规模光伏集群经柔性直流构网送出的运行控制技术研究[J]. 中国电机工程报, 2023, 43 (22): 8734 - 8745.
CAI Xipeng, HUANG Weihuang, LI Guiyuan, et al. Research on operation control strategy of large-scale photovoltaic cluster transmission via grid-forming VSC-HVDC[J]. Proceedings of

- the CSEE, 2023, 43(22): 8734 – 8745.
- [4] 辛保安, 郭铭群, 王绍武, 等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 1 – 8.
- XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1 – 8.
- [5] MA H, ZHENG T, ZHANG T, et al. A fault calculation method for large-scale photovoltaic integrated transmission systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2025(165): 110504.
- [6] 胡家兵, 袁小明, 程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5457 – 5467, 5594.
- HU Jiabing, YUAN Xiaoming, CHENG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5457 – 5467, 5594.
- [7] FANG Y, JIA K, YANG Z, et al. Impact of inverter-interfaced renewable energy generators on distance protection and an improved scheme [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(9): 7078 – 7088.
- [8] 李斌, 周博昊, 何佳伟, 等. 直驱风电场送出线路的正序电压极化距离保护适用性分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 16 – 24.
- LI Bin, ZHOU Bohao, HE Jiawei, et al. Applicability analysis of distance protection with positive-sequence voltage polarization for transmission lines of wind farm with direct-driven turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 16 – 24.
- [9] GHORBANI A, MEHRJERDI H, AL-EMADI N A. Distance-differential protection of transmission lines connected to wind farms [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017(89): 11 – 18.
- [10] SONG G, CHU X, GAO S, et al. Novel distance protection based on distributed parameter model for long-distance transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2116 – 2123.
- [11] LIANG Y, LI W, LU Z, et al. A new distance protection scheme based on improved virtual measured voltage [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 774 – 786.
- [12] LIANG Y, LI W, ZHA W. Adaptive MHO characteristic-based distance protection for lines emanating from photovoltaic power plants under unbalanced faults [J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(3): 3506 – 3516.
- [13] 王峰渊, 方愉冬, 赵萍, 等. 一种适用于光伏场站送出线的自适应距离保护改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 127 – 134.
- WANG Fengyuan, FANG Yudong, ZHAO Ping, et al. An improved adaptive distance protection scheme for the outgoing line of PV power station [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 127 – 134.
- [14] ZHANG F, MU L. A fault detection method of microgrids with grid-connected inverter interfaced distributed generators based on the PQ control strategy [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4816 – 4826.
- [15] 马红月, 郑涛, 周昊, 等. 计及控制切换的逆变电源并网系统故障计算方法[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 2985 – 2994.
- MA Hongyue, ZHENG Tao, ZHOU Hao, et al. A fault calculation method of the inverter grid-connected system considering control strategies switching [J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2985 – 2994.
- [16] LIN X, LIANG Z, ZHENG Y, et al. A current limiting strategy with parallel virtual impedance for three-phase three-leg Inverter under asymmetrical short-circuit fault to improve the controllable capability of fault currents [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 8138 – 8149.
- [17] ZHONG Y, KANG X, JIAO Z, et al. A novel distance protection algorithm for the phase-ground fault [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1718 – 1725.
- [18] 郑涛, 王可坛, 刘校销, 等. 可消除过渡电阻影响的单相接地距离保护研究[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 4045 – 4053.
- ZHENG Tao, WANG Ketan, LIU Xiaoxiao, et al. Research on single phase grounding distance protection against transition resistance [J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 4045 – 4053.
- [19] GHORBANI A, MEHRJERDI H, AL-EMADI N A. Distance-differential protection of transmission lines connected to wind farms [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017(89): 11 – 18.
- [20] 郑黎明, 贾科, 毕天姝, 等. 海上风电接入柔直系统交流侧故障特征及对保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 20 – 32.
- ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. AC-side fault analysis of a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms and the impact on protection [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 20 – 32.
- [21] 晁晨翔, 郑晓冬, 叶海, 等. 针对海上风电场汇集线路单相接地故障的柔直侧新型距离保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 5899 – 5908.
- CHAO Chenxu, ZHENG Xiaodong, YE Hai, et al. A novel MMC-side distance protection scheme for single-phase grounding fault of offshore wind farm collection line [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 5899 – 5908.
- [22] 翁汉琨, 蒋秋雨, 高靖怡, 等. 适应逆变型电源并网的工频变化量距离保护动作优化策略[J/OL]. 南方电网技术, 1 – 13 [2024 – 12 – 09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20241209.1645.012.html>.
- WENG Hanli, JIANG Qiuyu, GAO Jingyi, et al. Action optimization strategy of distance protection using power frequency fault components for grid-connected inverter power supply [J/OL]. Southern Power System Technology, 1 – 13 [2024 – 12 – 09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20241209.1645.012.html>.
- [23] 马静, 马伟, 闫新, 等. 基于阻抗复数平面的自适应距离保护方案[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 290 – 296.
- MA Jing, MA Wei, YAN Xin, et al. Impedance complex plane based adaptive distance protection scheme [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 290 – 296.
- [24] 晁晨翔, 郑晓冬, 高飘, 等. 针对光伏场站送出线路不对称短路故障的自适应距离保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6681 – 6693.
- CHAO Chenxu, ZHENG Xiaodong, GAO Piao, et al. Adaptive distance protection for transmission line of photovoltaic station during asymmetric short circuit [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6681 – 6693.

- [25] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [26] HOOSHYAR A, AZZOUZ M A, El-SAADANY E F. Distance protection of lines emanating from full-scale converter interfaced renewable energy power plants-part II: solution description and evaluation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1770 – 1780.
- [27] 郑涛, 章若竹, 吕文轩, 等. 故障主动控制下计及分布电容影响的 offshore ac 交流汇集线路时域距离保护[J/OL]. 电工技术学报, 1 – 16[2024 – 05 – 10]. <https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/dgjsxb202501010>.
ZHENG Tao, ZHANG Ruozhu, LV Wenxuan, et al. Time-domain distance protection of offshore ac transmission lines based on fault active control considering distributed capacitance's impact [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1 – 16[2024 – 05 – 10]. <https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/dgjsxb202501010>.
- [28] QU L, HOU B, YANG Z, et al. An enhanced impedance trajectory-based adaptive distance protection for renewable energy systems [C]//2024 IEEE 8th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), November 29 - December 02, 2024, Shenyang, China. New York: IEEE, 2024.

收稿日期: 2025-03-31; 网络首发日期: 2025-03-31

作者简介:

马红月(1993), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统故障分析及短路电流计算, 1025026963@qq.com;

李岩(1973), 男, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为高压直流输电技术和柔性直流输电技术等。

(上接第 97 页 Continued from Page 97)

- [26] 丁汀, 蒲天骄, 刘广一, 等. 基于柔性直流分区互联的受端城市电网无功电压控制策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2140 – 2145.
DING Ting, PU Tianjiao, LIU Guangyi, et al. Reactive voltage control strategy for receiving urban power grid based on flexible DC zonal interconnection[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2140 – 2145.
- [27] 何诗英, 黄连生, 陈晓娇, 等. 核聚变高功率直流测试平台实时控制系统设计[J]. 发电技术, 2024, 45(6): 1023 – 1029.
HE Shiyang, HUANG Liansheng, CHEN Xiaojiao, et al. Design of real-time control system for nuclear fusion high-power DC Test platform[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(6): 1023 – 1029.
- [28] 辛业春, 李尚轩, 王延旭, 等. 基于直流电流反馈的 MMC-HVDC 系统的中高频振荡抑制策略[J]. 中国电力, 2025, 58(1): 39 – 49.
XIN Yechun, LI Shangxuan, WANG Yanxu, et al. Mid- and high-frequency oscillation suppression strategy for MMC-HVDC system based on DC current feedback [J]. Electric Power, 2025, 58(1): 39 – 49.
- [29] 刘汉军, 周竞宇, 盛俊毅, 等. 高低阀串联型特高压柔性直流不控整流异步充电时分压特性及其对系统的影响[J]. 南方电网技术, 2023, 17(10): 22 – 31.
LIU Hanjun, ZHOU Jingyu, SHENG Junyi, et al. Voltage partial characteristics of uncontrolled rectifier asynchronous charging and its influence on VSC-UHVDC system with high and low valves in series[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(10): 22 – 31.

收稿日期: 2025-02-07; 网络首发日期: 2025-07-30

作者简介:

周月宾(1987), 男, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为直流输电与电力电子技术, zhouyb@csg.cn;

陈煜坤(1997), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为直流输电与电力电子技术, chenyl@csg.cn;

王国腾(1996), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为高比例可再生能源电力系统运行与控制, wgt339@zju.edu.cn。