

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250119

光伏电站接入柔性直流系统的交流侧不对称故障 稳态特征研究

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, 陕西 西安 710049; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510063)

摘要: 针对光伏电站接入柔性直流系统的交流侧故障特征受双端电力电子设备输出特性影响而与传统交流系统存在显著差异的问题, 提出结合系统拓扑、换流器故障控制策略的稳态故障特征分析方法, 以明晰设备间的序分量耦合特性。首先, 针对光伏电站接入柔性直流系统的交流侧不对称短路进行稳态故障特征分析, 揭示了双端电力电子设备输出电流的受控特征, 以及换流器并网点电压与输出电流之间的序分量耦合关系。然后, 重点分析了当光伏电站采用负序电流抑制策略时, 柔直换流器成为了系统唯一的负序电源, 得出了单相接地短路和相间短路的故障相差流特征与柔直换流器的负序电流存在定量关系的结论。同时指出了柔直换流器的负序电流限幅极大地改变了系统的序分量特征。最后, 通过某大规模光伏电站接入柔性直流系统的电磁暂态仿真, 验证了稳态故障特征分析结论的正确性, 为电力电子化新型电力系统保护原理的研究提供了理论与技术支撑。

关键词: 光伏电站; 柔性直流; 稳态故障特征; 交流故障; 控制策略; 序分量耦合

Steady-state characteristics of AC side asymmetrical faults in PV power plants integrated to VSC-HVDC systems

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 of China Southern Power Grid, Guangzhou 510063, China)

Abstract: To address the issue that the AC-side fault characteristics of photovoltaic (PV) power plants integrated into VSC-HVDC differ significantly from those of traditional AC systems due to the influence of power electronic devices at both ends, a steady-state fault characteristic analysis method is proposed that incorporates system topology and converter fault control strategies, in order to clarify the sequence-component coupling among devices. First, steady-state fault characteristics of AC-side asymmetric faults in PV power plants connected to VSC-HVDC are analyzed. The results reveal the controllable nature of the output currents from power electronic devices at both ends, as well as the relationship of sequence-component coupling between converter's grid-connected point voltage and its output current. Then, it is emphasized that when the PV power plants adopt the negative-sequence current suppression strategy, the HVDC converter becomes the sole source of negative-sequence current in the system. It is further concluded that, under single-phase-to-ground faults and phase-to-phase faults, the fault phase current differences exhibit a quantitative relationship with the negative-sequence current of the HVDC converter. It is also noted that the negative-sequence current limiting of the converter significantly alters the system's sequence-component characteristics. Finally, the correctness of the steady-state fault characteristic analysis is verified through electromagnetic transient simulations of a large-scale PV power plant integrated into a VSC-HVDC system, providing theoretical and technical support for the research of protection principles in power electronics dominated new power systems.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U23B20112).

Key words: PV power plant; VSC-HVDC; steady-state fault characteristics; AC fault; control strategy; sequence-component coupling

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U23B20112)

0 引言

当前, 大规模新能源基地的建设成为国家重大战略需求^[1-2]。至 2030 年, 我国将在沙漠、戈壁、荒漠地区建设新能源发电基地总装机约 4.55 亿 kW。新能源基地远离主干电网, 缺乏常规的同步电源支撑^[3]。构网型柔性直流输电方式可实现新能源侧交流孤网的电压频率主动支撑, 成为偏远地区大规模光伏发电基地远距离外送的首选方案^[4-5]。

随着新能源渗透率的增加和电力电子化程度的加深, 电网的动态性能发生了极大变化。柔直送出大规模新能源送端电网在多类型电力电子设备的相互作用下, 其运行特性和故障特征将发生显著变化^[6]。系统故障响应受电力电子设备控制策略与电网拓扑结构影响, 具有非线性、弱馈性等特征^[7-8], 这将极大地模糊故障与非故障的特征差异, 劣化传统保护装置的动作性能^[9-10]。因此, 亟需结合新能源并网换流器、柔直换流器的控制策略和送端电网的拓扑结构进行故障特征分析, 构建适用于新场景下的新型继电保护原理。

对于交流线路两端均为电力电子设备的复杂拓扑, 其双端受控特性和弱馈特性更加明显^[11-12]。对于新能源经柔直送出系统, 文献[11]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, 得出了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。文献[12]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[13-14]通过仿真分析了海上风电入柔性直流系统的故障电流特征, 由于故障点两侧电流受控, 常规差动保护的适用性受到挑战。文献[15]面向柔直构网新能源送端系统, 考虑了跟网/构网型电力电子设备的控制策略, 进行了稳态等值建模和故障计算。对于双端均为电力电子设备的系统, 在交流线路发生故障时, 换流器进入故障穿越模式, 将结合两侧的控制目标、运行约束条件等进行协调控制。故障期间, 两侧换流器的不同控制策略作用于故障的全过程, 同时与故障特性高度耦合。因此, 对换流器设备的建模应在其故障控制特性的基础上进行简化^[16]。

总之, 在大规模新能源全电力电子化的复杂场景下, 设备建模和故障特征分析需结合电力电子换流器的故障控制策略进行深入研究。因此, 本文结合工程实际, 以某大规模光伏电站接入柔性直流系统为研究场景, 计及了换流器的控制策略进行电力电子设备的等值建模, 基于对称分量法提取了系统交流侧的不对称故障特征量, 为新场景下保护新原理的研究提供了理论基础。

1 系统拓扑和换流器控制策略

1.1 系统拓扑

光伏电站经交流送出线路接入柔直换流站。系统拓扑和换流器的控制结构如图 1 所示。

图 1 中: 下标 P 和 M 分别表示光伏电站和柔直换流站侧; 下标 “+”、“-”、“0” 分别表示正序、负序、零序; 上标 “*” 表示参考值; Z_{M1} 、 Z_{M2} 分别表示送出线路故障点两侧的线路阻抗。

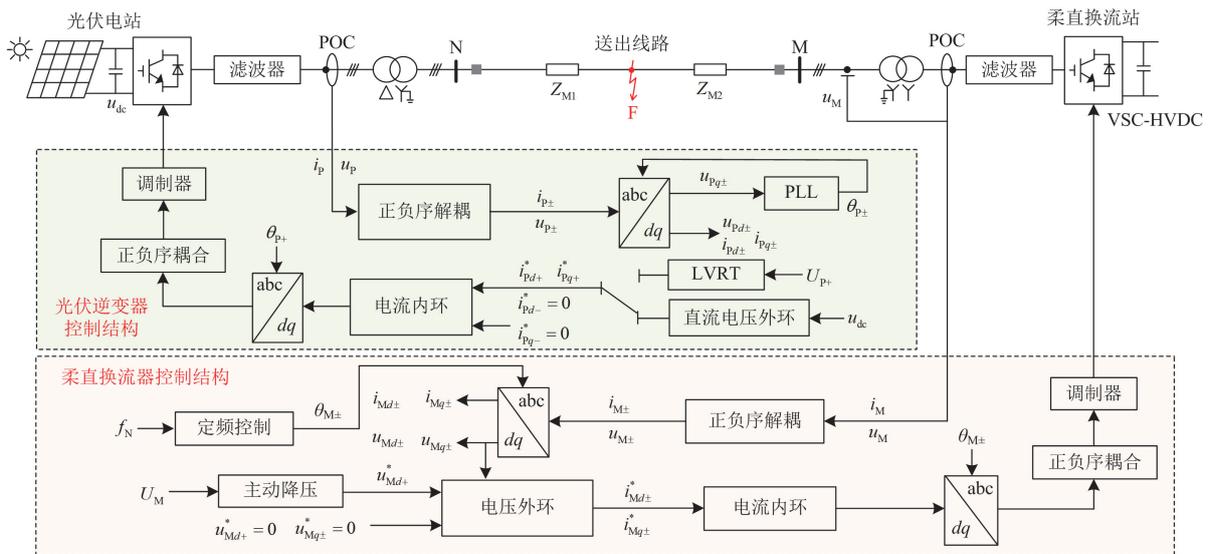


图 1 系统拓扑及换流器控制结构

Fig. 1 System topology and converter control structure

光伏逆变器和柔直换流器均采用了正负序解耦控制,其中光伏为跟网型逆变电源,利用锁相环对连接点(point of connection, POC)的电压相位 $\theta_{P\pm}$ 进行跟踪。柔直换流器为构网型电源,采用定频控制生成柔直换流器控制系统的电压参考相位 $\theta_{M\pm}$ 。

1.2 光伏逆变电源的控制策略

由图1可知,光伏逆变电源采用负序电流抑制策略^[17],在系统正常运行时,光伏逆变电源的正序电流参考值由直流电压外环控制输出,表示为

$$\begin{cases} i_{Pd+0}^* = \left(K_{up} + \frac{K_{ul}}{s} \right) (u_{dc}^* - u_{dc}) \\ i_{Pq+0}^* = i_{Pd-}^* = i_{Pq-}^* = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_{Pd+0}^* 为直流电压外环输出的正序 d 轴电流参考值; i_{Pq+0}^* 为光伏逆变电源正常运行时电流参考值的 q 轴正序分量; K_{up} 、 K_{ul} 分别为直流电压外环的比例和积分参数; s 为拉普拉斯算子; u_{dc}^* 和 u_{dc} 分别为直流电压的参考值和实际值; i_{Pd-}^* 、 i_{Pq-}^* 分别为光伏逆变电源输出电流参考值的 d 、 q 轴负序分量。

为满足系统的电压支撑需求,要求光伏电站须具备低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)能力。当检测到并网点正序电压 $U_{P+} < 0.9$ p.u.时,控制切换至LVRT模式^[18-19]。此时,正序电流参考值为

$$\begin{cases} 0 & U_{P+} > 0.9 \text{ p.u.} \\ 1.5(0.9 - U_{P+})I_{Prated} & 0.2 \text{ p.u.} \leq U_{P+} \leq 0.9 \text{ p.u.} \\ I_{Pmax} & U_{P+} < 0.2 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (2)$$

$$i_{Pd+}^* = \min \left\{ \sqrt{I_{Pmax}^2 - (i_{Pq+}^*)^2}, i_{Pq+0}^* \right\}$$

式中: i_{Pd+}^* 、 i_{Pq+}^* 分别为光伏逆变电源正序电流参考值的 d 、 q 轴分量; I_{Prated} 为光伏逆变电源正常运行时的额定电流; I_{Pmax} 为逆变器能够承受的最大电流,一般为其额定电流的1.2~1.5倍。

1.3 柔直换流器的控制策略

柔直换流器在正常运行期间电压外环采用定电压控制和负序电压抑制控制,具体控制方式为:当换流器检测到交流故障时,控制系统切换为电流控制模式(电压外环积分环节闭锁),以避免柔直换流器过流;在不对称故障期间,柔直换流器采用注入负序电流的控制策略来抑制负序电压,也为系统的负序电流提供通路;同时,正序电压外环采用主动降压控制模式,根据负序电压的幅值降低正序电压的参考值,以防止非故障相产生过电压。柔直换流器电压外环的参考值为

$$\begin{cases} u_{Md+}^* = U_{Mrated} - K_V U_{M-} \\ u_{Mq+}^* = u_{Md-}^* = u_{Mq-}^* = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_{Md+}^* 、 u_{Mq+}^* 和 u_{Md-}^* 、 u_{Mq-}^* 分别为柔直换流器POC电压参考值的 d 、 q 轴正序分量和负序分量; U_{Mrated} 为柔直换流器交流并网点电压幅值的额定值; K_V 为降压比例系数; U_{M-} 为柔直换流器并网点的负序电压幅值,表示为

$$U_{M-} = \sqrt{u_{Md-}^2 + u_{Mq-}^2} \quad (4)$$

式中: u_{Md-} 、 u_{Mq-} 分别为柔直换流器POC电压的 d 、 q 轴负序分量。

电压外环的控制方程为

$$\begin{cases} i_{Md\pm}^* = \left(K_{MP} + n \frac{K_{MI}}{s} \right) (u_{Md\pm}^* - u_{Md\pm}) \\ i_{Mq\pm}^* = \left(K_{MP} + n \frac{K_{MI}}{s} \right) (u_{Mq\pm}^* - u_{Mq\pm}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $i_{Md\pm}^*$ 、 $i_{Mq\pm}^*$ 分别为柔直换流器输出电流参考值的 d 、 q 轴正/负序分量; K_{MP} 、 K_{MI} 分别为电压外环的比例和积分参数; n 为电压外环的控制模式,当 $n=0$ 时,表示为电流控制模式,积分环节闭锁;当 $n=1$ 时,表示为电压控制模式,积分环节投入; $u_{Md\pm}$ 、 $u_{Mq\pm}$ 分别为柔直换流器POC电压的 d 、 q 轴正、负序分量。在故障期间,当检测到柔直换流器并网点正序电压 $U_{M+} < 0.9$ p.u.时,电压外环切换至电流控制模式($n=0$),柔直换流器向交流系统馈入负序电流。

2 稳态故障特征

换流器的并网点电压和电流由正序分量和负序分量组成,表示为

$$\begin{cases} x_a = x_{a+} + x_{a-} \\ x_b = x_{b+} + x_{b-} \\ x_c = x_{c+} + x_{c-} \end{cases} \quad (6)$$

式中: x_a 、 x_b 、 x_c 分别为a、b、c三相电压或电流。

在控制系统中,需首先对换流器的并网点电压和电流进行abc/dq变换,其表达式为

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \mathbf{T}_+ \begin{bmatrix} x_{a+} \\ x_{b+} \\ x_{c+} \end{bmatrix} + \mathbf{T}_- \begin{bmatrix} x_{a-} \\ x_{b-} \\ x_{c-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{d+} \\ x_{q+} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{d-} \\ x_{q-} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: x_d 、 x_q 分别为变量的 d 、 q 轴分量; \mathbf{T}_+ 、 \mathbf{T}_- 分别为正、负序分量的abc/dq变换矩阵,表示为

$$\mathbf{T}_{\pm} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_{\pm} & \cos(\theta_{\pm} - 120^\circ) & \cos(\theta_{\pm} + 120^\circ) \\ -\sin \theta_{\pm} & -\sin(\theta_{\pm} - 120^\circ) & -\sin(\theta_{\pm} + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: θ_{\pm} 为换流器 POC 的正、负序电压相位, 该值由换流器控制系统的锁相环或定频控制环输出。

当电流内环快速响应后, 实际电流与参考电流相等, 同时锁相频率接近工频(50 Hz), 此时电压和电流满足对称分量法的应用条件。因此, 在故障稳态期间可以利用对称分量法对系统电压和电流进行故障特征分析。

2.1 光伏电站与柔直换流站的等值模型

2.1.1 光伏逆变电源的稳态等值模型

光伏逆变电源输出电流的稳态等值模型^[20]为

$$\begin{cases} I_{P+} = \sqrt{(i_{Pd+}^*)^2 + (i_{Pq+}^*)^2} \\ \theta_{Pi+} = \arctan\left(\frac{i_{Pq+}^*}{i_{Pd+}^*}\right) + \theta_{P+} \end{cases} \quad (9)$$

式中: I_{P+} 、 θ_{Pi+} 分别为光伏逆变电源输出正序电流的幅值和相位; θ_{P+} 为光伏逆变电源 POC 正序电压的相位。

由于光伏逆变电源采用负序电流抑制策略, 稳态负序电流近似为零, 负序网络中光伏侧视为开路。在 LVRT 期间, 光伏控制系统中正序电流的参考值按照式(2)设置, 输出电流直接受控于光伏逆变电源 POC 的正序电压。因此, 在故障期间光伏逆变电源可被等值为正序受控电流源。

2.1.2 柔直换流器的稳态等值模型

正常运行和故障初始阶段, 柔直换流器呈现出电压源特性($n=1$), 其稳态等值模型为

$$\begin{cases} \dot{U}_{M+} = \dot{U}_{M\text{rated}} \\ \dot{U}_{M-} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: \dot{U}_{M+} 、 \dot{U}_{M-} 分别为柔直换流器并网点的正、负序电压; $\dot{U}_{M\text{rated}}$ 为柔直换流器并网点的额定电压。

在故障穿越期间, 电压外环切换至电流控制模式, 其积分环节闭锁, 因此柔直换流器呈现出电流源特性。由于构网型柔直换流器采用定频控制(50 Hz), 其故障稳态等值模型为

$$\begin{cases} I_{M+} = K_{MP} \sqrt{(U_{M\text{rated}} - K_V U_{M-} - u_{Md+})^2 + u_{Mq+}^2} \\ \theta_{Mi+} = \arctan\left(\frac{u_{Mq+}}{U_{M\text{rated}} - K_V U_{M-} - u_{Md+}}\right) \\ I_{M-} = K_{MP} U_{M-} \\ \theta_{Mi-} = \arctan\left(\frac{u_{Mq-}}{u_{Md-}}\right) \end{cases} \quad (11)$$

式中: I_{M+} 、 θ_{Mi+} 分别为柔直换流器输出正序电流的幅值和相位; I_{M-} 、 θ_{Mi-} 分别为柔直换流器输出负序电流的幅值和相位; u_{Md+} 、 u_{Mq+} 分别为柔直换

流器 POC 电压的 d 、 q 轴正序分量。

由式(11)可知, 柔直换流器输出的正序电流同时受控于 POC 的正序电压和负序电压; 负序电流与 POC 的负序电压相关。

然而, 当系统发生不对称故障时, 柔直换流器 POC 的负序电压突增, 受负序电压抑制控制作用, 其输出的负序电流将增大, 这可能会导致柔直换流器的总输出电流幅值超过设备耐受的最大电流。为了降低负序电流引起的电力电子设备过电流风险, 通常对负序电压外环输出的负序电流参考值进行限幅, 其控制框图如图 2 所示, 其中 $I_{\text{limit-}}$ 为负序电流限幅值。

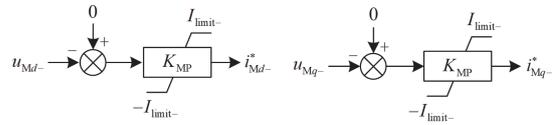


图 2 负序电压外环控制框图

Fig. 2 Negative-sequence voltage outer loop control diagram

由图 2 可知, 当不对称故障发生时, 系统节点电压的负序分量突增, 柔直换流器输出的负序电流极易达到限幅值。此时, $I_{\text{limit-}}$ 直接决定了柔直换流器对负序电压的抑制能力。当 $I_{\text{limit-}}$ 设置较小时, 在不对称故障期间换流器输出的负序电流受限, 柔直换流器 POC 的负序电压较高。根据主动降压控制(式(11)), 当 U_{M-} 增大时, I_{M+} 减小。也就是说, 柔直换流器的负序电流限幅值会直接影响其输出的负序电流、正序电流和 POC 负序电压。同时, 由于光伏逆变电源采用负序电流抑制策略, 对外表现为正序受控电流源。因此, 柔直换流器的等值负序受控电流源是本文研究系统中唯一的负序电源, 其限值将直接影响柔直换流器的输出特性, 进而影响系统的序分量特征。

当系统发生不对称故障时, 柔直换流器的端口同时存在正、负序的电压和电流, 因此柔直换流器交流侧的输出功率为

$$\begin{cases} P = P_0 + P_{2s} \sin(2\omega t) + P_{2c} \cos(2\omega t) \\ Q = Q_0 + Q_{2s} \sin(2\omega t) + Q_{2c} \cos(2\omega t) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ P_{2c} \\ P_{2s} \\ Q_0 \\ Q_{2c} \\ Q_{2s} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{Md+} & u_{Mq+} & u_{Md-} & u_{Mq-} \\ u_{Md-} & u_{Mq-} & u_{Md+} & u_{Mq+} \\ u_{Mq-} & -u_{Md-} & -u_{Mq+} & u_{Md+} \\ u_{Mq+} & -u_{Md+} & u_{Mq-} & -u_{Md-} \\ u_{Mq-} & -u_{Md-} & u_{Mq+} & -u_{Md+} \\ -u_{Md-} & -u_{Mq-} & u_{Md+} & u_{Mq+} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Md+} \\ i_{Mq+} \\ i_{Md-} \\ i_{Mq-} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: P_0 、 Q_0 分别为有功功率和无功功率的直流分量; P_{2s} 、 P_{2c} 和 Q_{2s} 、 Q_{2c} 分别为二次有功功率和无

功功率的正、余弦项分量的幅值； ω 为系统角频率。可以看出，由于电压和电流负序分量的存在，功率的二次分量均不为零。因此，在不对称故障期间柔直换流器交流侧的输出功率始终存在二次谐波分量。

当故障较严重(正序电压跌落较大或负序电压抬升较大)时，由于柔直换流器电压外环的积分环节闭锁，其 POC 的负序电压无法完全被抑制。同时，由式(3)和式(5)可知，柔直换流器的输出电流受 POC 电压的影响。因此，由式(13)可知，柔直换流器的输出功率与 i_{Md+} 、 i_{Md-} 、 i_{Mq+} 、 i_{Mq-} 、 u_{Md+} 、 u_{Md-} 、 u_{Mq+} 、 u_{Mq-} 这 8 个量均相关，变量之间存在着复杂的耦合关系。

2.2 系统的序网模型

当图 1 的送出线路 F 点发生不对称短路故障时，基于上述分析及光伏逆变电源、柔直换流器的故障稳态等值模型，建立系统的序网模型。

2.2.1 正序网络

系统的正序网络如图 3 所示。其中： \dot{U}_{P+} 为光伏侧 POC 的正序电压； \dot{I}_{P+} 、 \dot{I}_{M+} 分别为光伏电站和柔直换流器输出的正序电流，定义电流的正方向为从光伏侧指向柔直侧； \dot{U}_{F+} 、 \dot{I}_{F+} 分别为故障点的正序电压和电流。

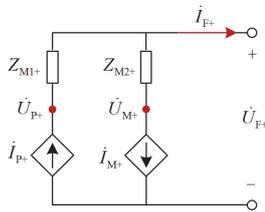


图 3 正序网络

Fig. 3 Positive-sequence network

由图 3 可知，正序网络中的电压和电流的关系为

$$\begin{cases} \dot{I}_{P+} - \dot{I}_{M+} = \dot{I}_{F+} \\ \dot{U}_{P+} = Z_{M1+} \dot{I}_{P+} + \dot{U}_{F+} \\ \dot{U}_{M+} = \dot{U}_{F+} - \dot{I}_{M+} Z_{M2+} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中仅包含电压和电流正序分量的关系，结合式(11)的柔直换流器等值模型，正序网络中存在正序量与负序量的耦合，这会对构造基于正序分量的保护方案造成困难。

2.2.2 负序网络

系统的负序网络如图 4 所示。其中： \dot{U}_{P-} 为光伏侧 POC 的负序电压； \dot{I}_{M-} 为柔直换流器输出的负序电流； \dot{U}_{F-} 、 \dot{I}_{F-} 分别为故障点的负序电压和电流。柔直换流器的负序等值受控电流源为系统唯一的负序电源。

序电源。

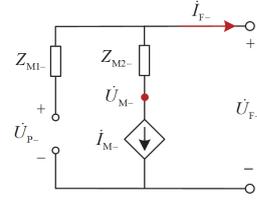


图 4 负序网络

Fig. 4 Negative-sequence network

由图 4 可知，负序网络中的电压和电流的关系为

$$\begin{cases} \dot{I}_{M-} = -\dot{I}_{F-} \\ \dot{U}_{P-} = \dot{U}_{F-} \\ \dot{U}_{M-} = \dot{U}_{F-} - Z_{M2-} \dot{I}_{M-} \end{cases} \quad (15)$$

可以看出，故障线路一侧无负序电流，另一侧为柔直换流器输出的负序电流，两侧的负序电流差异显著。

2.2.3 零序网络

系统的零序网络如图 5 所示。其中： \dot{U}_{M0} 为柔直换流器 POC 的零序电压； \dot{I}_{P0} 为光伏侧的零序电流； \dot{U}_{F0} 、 \dot{I}_{F0} 分别为故障点的零序电压、电流。

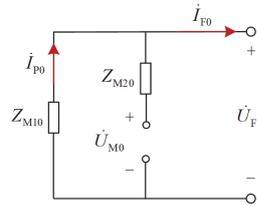


图 5 零序网络

Fig. 5 Zero-sequence network

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为零。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。

由图 5 可知，零序网络中的电压和电流的关系为

$$\begin{cases} \dot{I}_{P0} = \dot{I}_{F0} \\ \dot{U}_{M0} = \dot{U}_{F0} \end{cases} \quad (16)$$

考虑到高压系统零序电流分支系数为常数^[19]，当光伏送出系统存在多条支路时，各支路的零序电流存在比例关系。

综上所述，根据换流器的控制策略和序网模型可以得出以下结论：

1) 柔直换流器输出的正序电流受 POC 负序电压的影响，存在序分量耦合关系；

2) 不对称故障期间, 柔直换流器必然会输出负序电流, 是整个系统唯一的负序电源;

3) 由于光伏侧负序开路, 故障点靠近光伏侧的线路中无负序电流, 另一侧的负序电流由柔直换流器输出, 两侧负序电流差异明显;

4) 当系统发生接地短路故障时, 各条线路上的零序电流之间存在常数比例关系。

2.3 单相接地短路

在图1送出线路的F点发生单相接地短路故障时, 特殊相a相的系统复合序网如图6所示。其中 R_F 为不对称短路故障的过渡电阻。

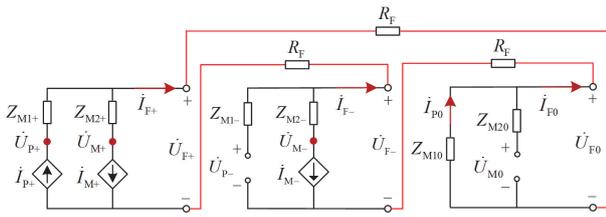


图6 单相接地短路故障的复合序网

Fig. 6 Composite sequence network under single-phase grounding short-circuit fault

结合单相接地短路的边界条件可以得出

$$\dot{I}_{F0} = \dot{I}_{P0} = -\dot{I}_{M-} \quad (17)$$

故障点的零序电流与柔直换流器输出的负序电流相等。由于柔直换流器输出的负序电流受其故障控制策略的影响, 零序电流也呈现受控特征。

因此, 故障电流可以表示为

$$\dot{I}_F = \dot{I}_{F+} + \dot{I}_{F-} + \dot{I}_{F0} = -3\dot{I}_{M-} \quad (18)$$

结合图6的序网模型, 忽略柔直侧零序电流, 故障电流还可以表示为

$$\dot{I}_F = \dot{I}_{P+} - \dot{I}_{M+} - \dot{I}_{M-} + \dot{I}_{P0} \quad (19)$$

由于电流正方向为从光伏侧指向柔直侧, 因此故障点电流也是故障相的差流, 式(18)还可以表示为

$$\Delta \dot{I}_a = \dot{I}_{Pa+} + \dot{I}_{Pa0} - (\dot{I}_{Ma+} + \dot{I}_{Ma-}) = -3\dot{I}_{M-} \quad (20)$$

式中: $\Delta \dot{I}_a$ 为故障相差流; \dot{I}_{Pa+} 、 \dot{I}_{Pa0} 分别为光伏侧的a相正序、零序电流; \dot{I}_{Ma+} 、 \dot{I}_{Ma-} 分别为柔直侧的a相正序、负序电流。

式(20)表明, 故障相的差流幅值为3倍的柔直侧负序电流幅值, 二者的相位差为 180° 。由于柔直侧的零序电流几乎为零, 因此故障相的差流幅值约等于光伏侧零序电流幅值的3倍。因此, 当判定故障为单相接地短路时, 可以通过检测柔直侧的负序电流间接表征故障相差流。利用正常运行时故障相差流为零和单相接地短路时故障相差流较大的差异

来构造保护判据, 即

$$|\Delta \dot{I}_f| \approx |3\dot{I}_{M-}| \geq I_{set1} \quad (21)$$

式中: $\Delta \dot{I}_f$ 为故障相差流, a相接地短路故障时 $f = a$; I_{set1} 为单相接地短路故障的动作电流整定值^[21]。

结合零序网络, 推导出单相接地短路的故障距离阻抗 Z_{M10} 表示为

$$Z_{M10} = \frac{\dot{U}_{M0}}{\dot{I}_{M-}} \quad (22)$$

可以看出, 当送出线路发生单相接地短路故障时, 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。

2.4 两相短路

在图1送出线路的F点发生两相(ab相)短路故障时, 特殊相c相的系统复合序网如图7所示。

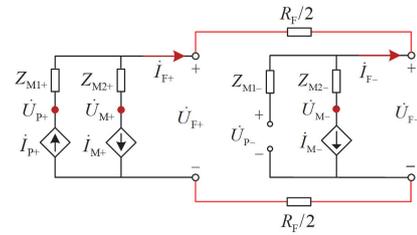


图7 两相短路故障的复合序网

Fig. 7 Composite sequence network under phase-to-phase fault

考虑到光伏逆变电源采用负序电流抑制策略, 结合两相短路的边界条件可以得出

$$\begin{cases} \dot{I}_{P+} = \dot{I}_{M+} + \dot{I}_{M-} \\ \dot{U}_{F+} - \dot{U}_{F-} = R_F \dot{I}_{M-} \end{cases} \quad (23)$$

结合式(23), 故障相a相的差流 $\Delta \dot{I}_a$ 可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_a &= \dot{I}_{Pa+} - (\dot{I}_{Ma+} + \dot{I}_{Ma-}) = \\ & \dot{I}_{P+} \angle -120^\circ - (\dot{I}_{M+} \angle -120^\circ + \dot{I}_{M-} \angle 120^\circ) = \\ & -j\sqrt{3}\dot{I}_{M-} = -j\sqrt{3}\dot{I}_{Ma-} \angle -120^\circ = \sqrt{3}\dot{I}_{Ma-} \angle 150^\circ \end{aligned} \quad (24)$$

式(24)表明, 故障相的差流幅值为 $\sqrt{3}$ 倍的柔直侧负序电流幅值, 两者的相位相差为 150° 。同理, 可以通过检测柔直侧的负序电流间接表征两相短路的故障相差流, 保护判据为

$$|\Delta \dot{I}_f| = |\sqrt{3}\dot{I}_{M-}| \geq I_{set2} \quad (25)$$

式中: I_{set2} 为两相短路故障的动作电流整定值。

同时, 当系统发生两相短路时, 节点电压的负序分量较大, 柔直侧会输出较大的负序电流, 故障相的差流特征明显。并且, 两相短路的故障距离阻抗受过渡电阻影响显著, 可在阻抗复平面推导出故障距离^[22]。

2.5 两相接地短路

在图 1 送出线路的 F 点发生两相(ab 相)接地短路故障时,特殊相 c 相的系统复合序网如图 8 所示。

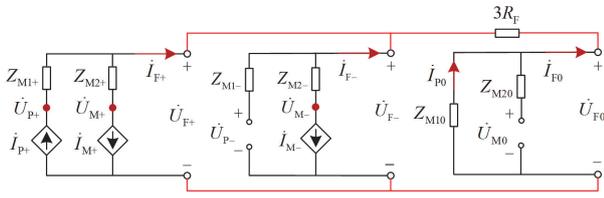


图 8 两相接地短路故障时的复合序网

Fig. 8 Composite sequence network under phase-to-phase grounding short-circuit fault

两相接地短路故障的边界条件为

$$\begin{cases} \dot{I}_{P+} - \dot{I}_{M+} - \dot{I}_{M-} = -\dot{I}_{F0} \\ \dot{U}_{F+} = \dot{U}_{F-} = \dot{U}_{F0} - 3R_F \dot{I}_{F0} \end{cases} \quad (26)$$

将式(26)结合序网模型,推导出两相接地短路的故障距离阻抗为

$$Z_{M2} = -\frac{\dot{U}_{M+} - \dot{U}_{M-}}{\dot{I}_{M+} - \dot{I}_{M-}} \quad (27)$$

可以看出,当送出线路发生两相接地短路故障时,基于序分量的故障距离阻抗不受过渡电阻的影响。

综上所述,当目标系统发生不对称故障时,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°。根据零序网络推导出的故障距离阻抗不受过渡电阻的影响。

2) 两相短路故障的系统负序电压较大,故障线路的负序差流特征明显。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) 对于单相接地短路和两相短路故障,可以利用柔直侧负序电流间接表征故障相差流,构造电流保护判据。

4) 两相接地短路的故障距离阻抗仅通过柔直侧的电压和电流量即可推导得出,且不受过渡电阻的影响。

3 仿真分析

在 PSCAD 中搭建如图 1 所示的系统,其中光伏电站的总容量为 1000 MW,经变压器升压至 500 kV 汇集至柔直换流站。系统正常运行至 1 s 时,在交流送出线路中点 F 处发生不对称短路故障,故障持续时间为 0.3 s。

3.1 不对称故障的电流特征

3.1.1 单相接地短路

当送出线路的 F 点发生单相接地短路故障时,线路两侧(柔直侧和光伏侧)的序电流如图 9 所示。

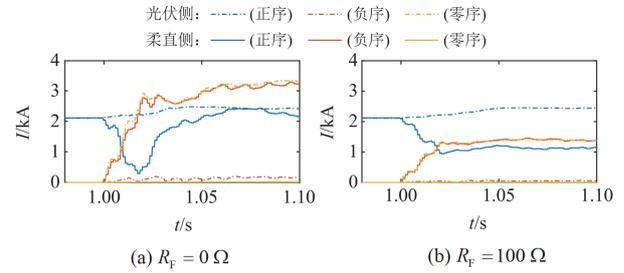


图 9 单相接地短路时故障点两侧序电流

Fig. 9 Sequence current on both sides of fault point under single-phase grounding short-circuit fault

可以看出,单相接地故障的光伏侧零序电流与柔直侧负序电流几乎相等,这与式(17)的序电流分析结果一致。

3.1.2 两相短路

当送出线路的 F 点处发生 ab 两相短路故障时,线路两侧(柔直侧和光伏侧)的序电流如图 10 所示。

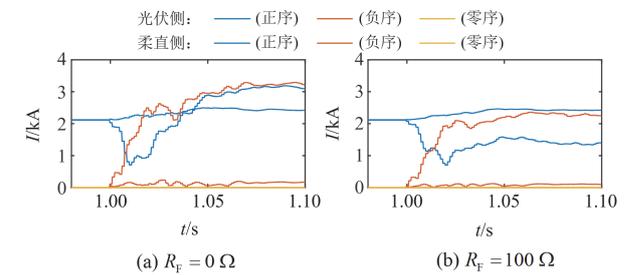


图 10 两相短路时故障点两侧序电流

Fig. 10 Sequence current on both sides of fault point under phase-to-phase short circuit fault

可以看出,由于两相短路故障的系统不含零序电流,光伏侧的电流较小,换流器输出电流呈现出明显的幅值受限特征。

3.1.3 两相接地短路

当送出线路的 F 点发生两相接地短路故障时,线路两侧(柔直侧和光伏侧)的序电流如图 11 所示。

可以看出,由于两相接地短路故障的系统负序电压较低,柔直换流器输出的负序电流较小。

综上所述,当系统发生故障时,光伏逆变电源输出的正序电流幅值受限特征明显;对于接地故障,由于故障点和光伏侧变压器之间存在零序通路,光伏侧的零序电流较大,是故障电流的主要分量。

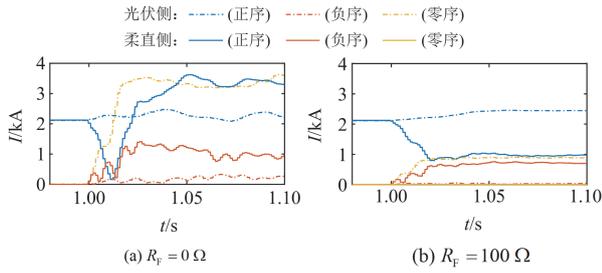


图 11 两相接地短路时故障点两侧序电流

Fig. 11 Sequence current on both sides of fault point under phase-to-phase grounding short circuit fault

3.2 故障线路两侧的差流特征

3.2.1 单相接地短路

当送出线路的 F 点发生 a 相接地短路故障时, 故障相差流和柔直侧负序电流的幅值和相位如图 12 所示。

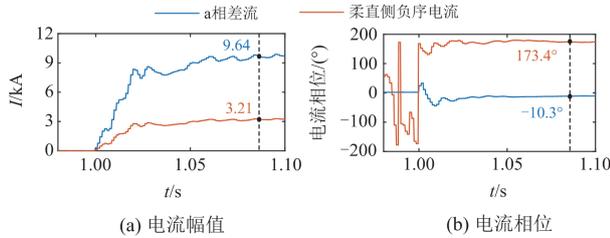


图 12 单相接地短路的故障相差流

Fig. 12 Fault phase differential current under single-phase grounding short-circuit fault

单相接地短路的故障相差流幅值约是柔直侧负序电流幅值的 3 倍, 两者的相位相差接近 180° , 这与式(20)的推导结果一致。

3.2.2 相间短路

当送出线路的 F 点发生 ab 两相短路时, 故障 a 相的差流和柔直侧负序电流的幅值和相位如图 13 所示。

相间短路的故障相差流幅值是柔直侧负序电流幅值的 $\sqrt{3}$ 倍, 两者的相位相差接近 150° , 这与式(24)

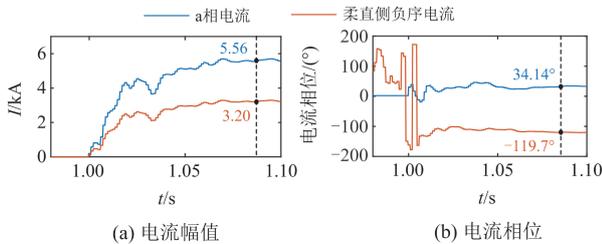


图 13 相间短路故障时故障相差流

Fig. 13 Fault phase differential current under phase-to-phase short-circuit fault

的推导结果一致。

因此, 通过控制增大柔直换流器向交流系统注入的负序电流, 不仅可以有效抑制柔直换流器 POC 的负序电压, 还能进一步凸显故障相差流特征, 有利于系统电压平衡和电流差动保护的動作。

3.3 换流器端口的故障输出特征

3.3.1 柔直换流站的故障输出特征

当送出线路的 F 点发生 a 相接地短路故障时, 柔直换流站交流并网点处的序电压和序电流如图 14 所示。

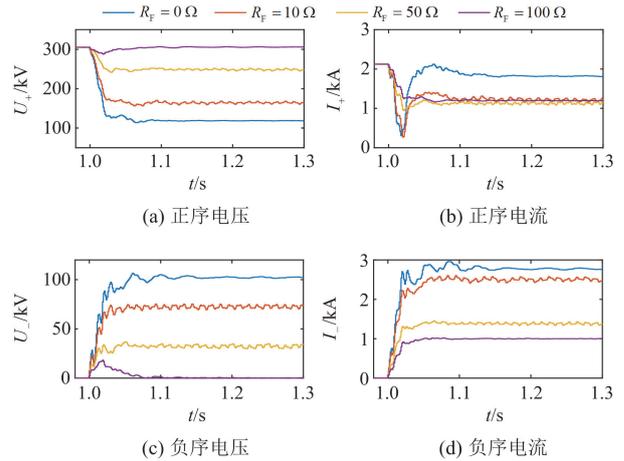


图 14 柔直换流站并网点的序电压和序电流

Fig. 14 Sequence voltage and current at POC of flexible DC converter

随着过渡电阻的增大, 系统的不平衡度降低, 节点电压的正序分量将增大, 负序分量将减小。根据式(11)可知, 柔直侧输出的正序电流与其并网点电压的正序分量和负序分量均存在耦合关系, 其负序电流会随着过渡电阻的增大而减小。

在图 14 中, 当过渡电阻为 0、10 Ω 和 50 Ω 时, 柔直换流器并网点处的负序电压明显增大, 输出的负序电流与负序电压呈现比例关系, 符合式(11)的稳态电流模型。当出现高阻接地故障 ($R_f = 100 \Omega$) 时, 柔直换流器并网点的正序电压跌落较小, 故障穿越策略尚未启动, 柔直换流器仍呈现电压源特性。

3.3.2 光伏电站的故障输出特征

当送出线路的 F 点发生 a 相接地短路时, 光伏电站并网点的正序电压和正序电流如图 15 所示。

根据式(2)可知, 在光伏输出电流未受限前, 过渡电阻越大, 光伏的输出电流越小。在图 15 中, 在过渡电阻较小时 ($R_f = 0, 10, 50 \Omega$), 光伏并网点的正序电压跌落较大, 其输出电流幅值直接受限于逆变器的最大电流。当过渡电阻较大时 ($R_f = 100 \Omega$), 光伏并网点的正序电压高于 0.9 p.u., 系统仍处于直流

电压外环控制，光伏电站输出电流与正常运行时的输出电流相当。

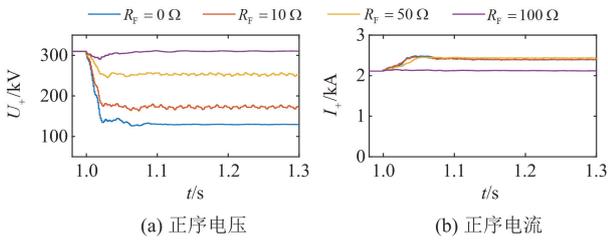


图 15 光伏电站并网点的正序电压和正序电流

Fig. 15 Positive sequence voltage and current at the POC of PV power plant

3.4 柔直流器电流限幅对故障特征的影响

以 a 相接地故障为例，对电压外环输出的负序电流参考值进行限幅。当设置负序外环的输出限幅值分别为 0.2、0.5 和 1.0 p.u. 时，柔直流器控制系统中 dq 轴电流和电压波形分别如图 16 和图 17 所示。

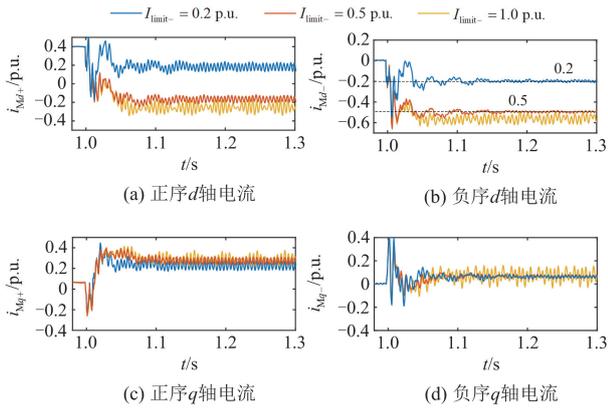


图 16 柔直流器的 dq 轴电流

Fig. 16 dq-axis current of flexible DC converter

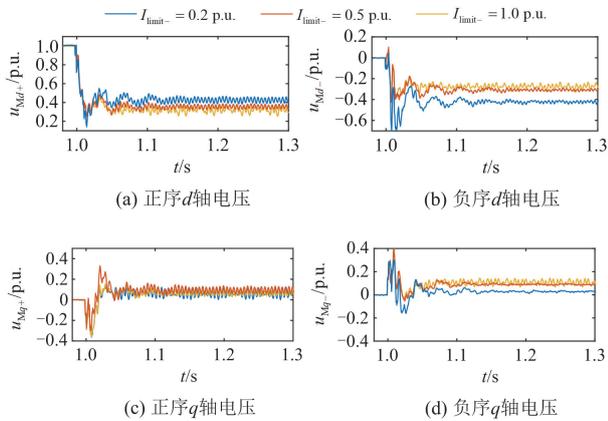


图 17 柔直流器的 dq 轴电压

Fig. 17 dq-axis voltage of flexible DC converter

由图 16 和图 17 可知， i_{Md+} 、 i_{Md-} 、 u_{Md-} 和 u_{Mq-} 受负序电流限幅的影响较为明显。当系统发生不对称故障时，柔直流器向交流系统注入负序电流抑制其并网点的负序电压。当负序电流的限幅值越大时，柔直流器输出的负序电流越大， u_{Md-} 越小，即负序电压的抑制效果越明显。由式(3)和式(5)可知(电流控制模式， $n=0$)，负序电压 U_{M-} 将直接影响 d 轴正序电流 i_{Md+}^* ， U_{M-} 越小， i_{Md+}^* 越大；而正序电流的 q 轴分量 i_{Mq+} 仅与正序电压 u_{Mq+} 相关，因此在负序电流限幅值不同时变化不大。同时，当限幅较大时(1.0 p.u.限幅)， i_{Md-} 在限制范围内出现明显波动。因此，为防止控制器出现饱和现象，需要对电流参考值进行限制，避免其产生较大的突变量。

当负序电流限幅值不同时，柔直流器并网点的电压和电流的序分量分别如图 18 和图 19 所示。

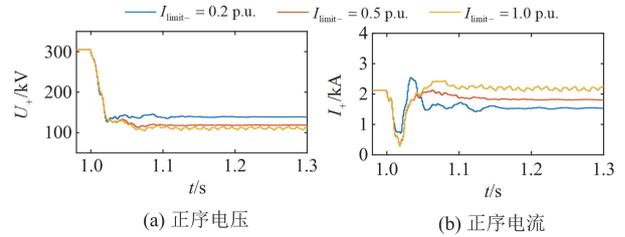


图 18 柔直流器并网点的正序电压和正序电流

Fig. 18 Positive sequence voltage and current at the POC of flexible DC converter

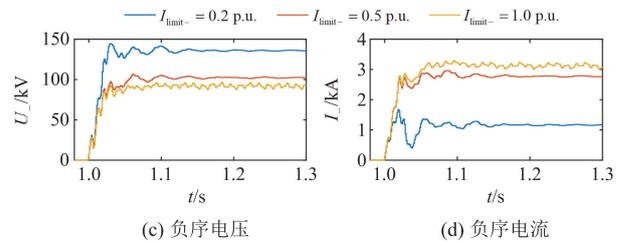


图 19 柔直流器并网点的负序电压和负序电流

Fig. 19 Negative sequence voltage and current at the POC of flexible DC converter

由图 18 和图 19 可知，随着负序电流限幅值的增大，柔直流器向系统注入的负序电流增大，其并网点的负序电压显著减小。同时，正序电流将随着负序电压的减小而增大。值得注意的是，由式(17)可知，在发生单相接地短路故障时，柔直流器输出的负序电流与故障点处的零序电流相等。综上，柔直流器的负序电流限幅值不同时将极大地影响系统的序分量特征。

当负序电流限幅分别为 0.2 p.u. 和 0.5 p.u. 时，柔

直换流器的输出功率如图 20 所示。

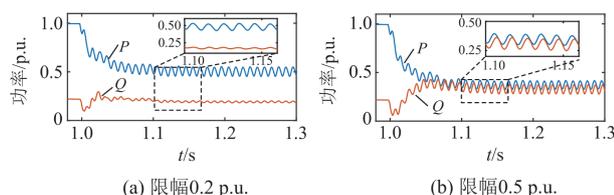


图 20 柔直换流器的输出功率

Fig. 20 Output power of the flexible DC converter

结合式(12)、式(13)与图 20, 柔直换流器输出的负序电流大小与其向交流系统注入无功功率的大小相关。同时, 在不对称故障期间, 柔直换流器的并网点处同时存在负序电流和负序电压, 因此柔直换流器的输出功率始终存在二倍频分量^[23]。

4 结论

本文分析了光伏电站接入柔性直流系统交流侧不对称故障的稳态特征, 主要结论如下:

1) 建立了控制系统中受控变量和系统电压、电流之间的联系, 说明了对称分量法对稳态故障分析的适用性;

2) 结合换流器的故障控制策略, 将其等效为受控电流源, 简化了复杂的电力电子化系统;

3) 光伏侧和柔直侧的正序电流和负序电流弱馈特征明显, 同时存在序间耦合特性; 柔直侧的负序电流限幅极大地改变了系统的序分量特征;

4) 对于双端电力电子化系统, 交流送出线路的故障特征与电力电子设备的控制策略紧密相关, 利用其故障控制特性可为新场景下的保护原理提供更多思路。需要说明的是, 所提取的稳态故障特征是在目标场景中得到的, 对于采用其他控制策略和不同拓扑结构的新能源经柔直并网系统, 其故障特征还应进行具体的分析和研究。

参考文献

[1] 许洪华, 邵桂萍, 鄂春良, 等. 我国未来能源系统及能源转型现实路径研究[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 484-491.
XU Honghua, SHAO Guiping, E Chunliang, et al. Research on China's future energy system and the realistic path of energy transformation[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 484-491.

[2] 蔡文亮, 赵正晖, 汪洋, 等. 面向新型能源结构的系统调频技术回顾与展望[J]. 电测与仪表, 2023, 60(10): 1-9.
CAI Wenliang, ZHAO Zhenghui, WANG Yang, et al. Review and prospect of frequency modulation technology for new energy structure[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10): 1-9.

[3] 王若为, 李音璇, 葛维春, 等. 沙漠光伏电能外送技术综述[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 32-41.
WANG Ruwei, LI Yinxuan, GE Weichun, et al. Summary of desert photovoltaic power transmission technology[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 32-41.

[4] 聂铭, 和敬涵, 李猛, 等. 基于半桥 MMC 特征信号注入的柔性直流线路频变参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 33-43.
NIE Ming, HE Jinghan, LI Meng, et al. Flexible DC line frequency-dependent parameter identification based on characteristic signal injection with HB-MMC[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 33-43.

[5] 薛明军, 陈福锋, 杨林刚, 等. 海上风电交流送出线路继电保护优化设计[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 150-159.
XUE Mingjun, CHEN Fufeng, YANG Lingang, et al. Optimized design of relay protection for an offshore wind power outgoing transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 150-159.

[6] YANG Z, WANG H, LIAO W, et al. Protection challenges and solutions for AC systems with renewable energy sources: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2025, 10(1): 18-39.

[7] 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.

[8] 沙兆义, 王聪博, 詹荣荣, 等. 基于故障全电流多阶突变的换流器并网线路纵联保护[J]. 中国电力, 2024, 57(2): 62-71.
SHA Zhaoyi, WANG Congbo, ZHAN Rongrong, et al. Pilot protection for converter-interconnected lines based on multi-stage mutation of fault current[J]. Electric Power, 2024, 57(2): 62-71.

[9] 赖逸洋, 王增平, 王彤. 电流差动保护在柔直接入的交流电网中适应性分析及改进措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 145-154.
LAI Yiyang, WANG Zengping, WANG Tong. Adaptability analysis of current differential protection in an AC power grid with an MMC-HVDC and improvement measures[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 145-154.

[10] 刘晓军, 金小东, 刘迎迎, 等. 基于限流电抗器两侧特定频段暂态能量比的 MTDC 电网单端量保护方案[J]. 智慧电力, 2024, 52(1): 87-94.
LIU Xiaojun, JIN Xiaodong, LIU Yingying, et al. Single-end electrical quantity protection scheme for MTDC power grid based on specific frequency band transient energy ratio on both sides of current-limiting reactor[J]. Smart Power, 2024, 52(1): 87-94.

- [11] 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.
- [12] 晁晨栩, 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.
- [13] 程骁, 顾乔根, 任旭超, 等. 海上风电柔性直流输电换流变差动保护的适应性分析[J]. 浙江电力, 2024, 43(3): 8-18.
CHENG Xiao, GU Qiaogen, REN Xuchao, et al. Adaptability analysis on differential protection of converter transformers in a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(3): 8-18.
- [14] 余越, 王聪博, 沙兆义, 等. 基于矩阵突变特征的风电经柔直送出交流线路保护[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5441-5450.
YU Yue, WANG Congbo, SHA Zhaoyi, et al. AC transmission line protection for wind farms integrated with VSC-HVDC system based on matrix mutation characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5441-5450.
- [15] 何佳伟, 周博昊, 李斌, 等. 柔直构网新能源送端系统故障响应特性计算方法[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(1): 69-79.
HE Jiawei, ZHOU Bohao, LI Bin, et al. Calculation method for fault response characteristics of renewable energy sending-end flexible DC grid-forming transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 69-79.
- [16] 宋国兵, 陶然, 李斌, 等. 含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 2-12.
SONG Guobing, TAO Ran, LI Bin, et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 2-12.
- [17] 钟术威, 车延博, 苏鉴博, 等. 风电经柔直送出系统送端交流故障低电压穿越策略[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(8): 87-96.
ZHONG Shuwei, CHE Yanbo, SU Jianbo, et al. Low voltage ride-through strategy for sending-end AC faults in flexible DC system for wind power transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(8): 87-96.
- [18] 王瑞, 商飞, 王良全. 基于 LabVIEW 的光伏逆变器低电压穿越检测方法研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(3): 178-182.
WANG Rui, SHANG Fei, WANG Liangquan. Research on low voltage ride through detection method of photovoltaic inverter based on LabVIEW[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(3): 178-182.
- [19] 李东晟, 沈沉, 吴林林, 等. 考虑初始风速与机端故障稳态电压跌落程度的直驱风机故障响应特性分类及其判别方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1247-1260.
LI Dongsheng, SHEN Chen, WU Linlin, et al. Study on fault response characteristics classification and discriminant method of PMSG considering initial wind speed and drop degree of terminal fault steady-state voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1247-1260.
- [20] 余越, 韦明杰, 吕鹏飞, 等. 适用于不对称故障短路计算的新能源场站实用化建模方法[J]. 电网技术, 2024, 48(11): 4788-4795.
YU Yue, WEI Mingjie, LÜ Pengfei, et al. Practical equivalence of new energy generator field for the asymmetrical fault short circuit calculation[J]. Power System Technology, 2024, 48(11): 4788-4795.
- [21] 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.
- [22] 晁晨栩, 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.
- [23] 郑涛, 黄予园, 宗伟, 等. 光伏并网系统故障二次谐波产生机理及其对变压器保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 13-22.
ZHENG Tao, HUANG Yuyuan, ZONG Wei, et al. Second harmonic generation mechanism of a photovoltaic grid-connected system fault and its influence on transformer protection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 13-22.

收稿日期: 2025-02-05; 修回日期: 2025-07-12

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故障电流计算; E-mail: 1025026963@qq.com.

郑涛(1977—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制、通信与电力物联网。E-mail: tzheng@mail.xjtu.edu.cn.

(编辑 张颖)