

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240057

离网型制氢系统典型短路故障分析及协同保护

赵东¹, 何山^{1,2}, 韩璐¹, 袁至¹, 徐立军³, 樊小朝³

1. 新疆大学可再生能源发电与并网技术自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017;
2. 新疆大学可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830017;
3. 新疆工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023)

摘要: 离网型新能源发电制氢系统输电线路很可能因故障而造成系统崩溃, 故障的快速检测与切除是保证其正常运行的关键。为实现离网型制氢系统线路全范围故障检测, 同时实现后备保护与主保护的协调配合, 提出一种以故障瞬时功率差分变化率为主保护、本地功率变化率构成后备保护的协同保护方法。首先, 确立离网型制氢系统拓扑结构, 建立离网制氢电网模型。其次, 利用回路分析法推导短路故障电流、电压, 计算故障瞬时功率差分变化率。最后, 分析不同故障类型下正负极瞬时功率差分变化率特征。当系统通信正常时, 利用其故障瞬时功率差分变化率与阈值进行比较以启动主保护, 再利用故障后功率差分变化率构造选极坐标系, 实现故障选极。当通信故障时, 后备保护快速切除故障, 避免故障范围进一步扩大。该协同保护方法具有良好的速动性、选择性和可靠性, 且能应对通信故障的情况。

关键词: 离网制氢; 故障检测; 协同保护; 通信故障

Typical short-circuit fault analysis and cooperative protection of an off-grid hydrogen production system

ZHAO Dong¹, HE Shan^{1,2}, HAN Lu¹, YUAN Zhi¹, XU Lijun³, FAN Xiaochao³

1. Renewable Energy Power Generation and Grid-connected Technology in the Autonomous Region, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;
2. Engineering Research Center of Renewable Energy Power Generation and Grid-connected Control, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;
3. Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China)

Abstract: The transmission line of off-grid new energy generation hydrogen production systems is likely to cause system collapse due to faults, and the rapid detection and removal of faults is key to ensuring normal operation. To realize the full-range fault detection of off-grid hydrogen production system lines, and at the same time realize the coordination between the backup protection and the main protection, a cooperative protection method based on the fault instantaneous power differential rate of change as the main protection and the local power rate of change constituting the backup protection is proposed. First, the topology of off-grid hydrogen production system is established, and the hydrogen production grid is modeled. Secondly, the short-circuit fault currents and voltages are derived using loop analysis, and the instantaneous power differential rate of change of the fault is calculated. Finally, the positive and negative instantaneous power differential rate of change characteristics are analyzed with different types of faults. When the system communication is normal, the main protection is activated by comparing its fault instantaneous power differential rate of change with the threshold value, and then the post-fault power differential rate of change is used to construct the pole selection coordinate system to realize the fault pole selection. In the case of communication failure, the backup protection quickly removes the fault to avoid further expansion of the fault scope. This synergistic protection method has good speed, selectivity, reliability, and can cope with communication failure.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52266018).

Key words: off-grid hydrogen production; fault detection; synergistic protection; communications failure

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52266018); 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目资助(2022B01003-3); 新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题资助(2023D04029); 国家科技部第三次新疆综合科学考察课题资助(2021xjkk1102)

0 引言

新能源发电电解水制氢是未来解决能源问题的重要手段之一, 新能源发电以氢能形式储存或利用, 实现了新能源发电就地开发与消纳^[1]。新能源发电制氢现阶段主要围绕多能源的协调控制策略、储能及容量配置、能量管理、电解水制氢技术等展开, 关于制氢系统的继电保护方法研究尚存在不足^[2-4]。直流制氢系统需要安全可靠的输电线路, 然而风光资源和制氢负荷的随机性与波动性将对电解制氢的动态运行产生不利影响^[5]。当前针对直流系统的故障检测方法仍在数毫秒级^[6], 因此研究直流制氢系统故障检测方法, 缩短保护动作时间, 保障其安全稳定运行具有重要意义。

目前, 根据直流输电系统的保护是否需要通信主要分为两大类^[7]。无需通信的保护: 利用其单端电流、电压等电气量与一个预定义的阈值进行比较^[8-9], 如过电流、欠压/过压、电压和电流导数保护等, 具有很好的速动性。文献[10]提出了一种根据电流的一阶和二阶导数在故障瞬间的变化特征识别故障, 避免了通信的延迟, 但其故障判据阈值整定不易。文献[11]针对馈线故障提出了暂态故障电流变化率绝对值的反时限保护, 做到了快速切除故障, 但未对高阻抗接地故障进行讨论。文献[12]针对高压直流输电线路微分欠压保护分析了故障后电气量特性, 提出了保护定值整定方法, 但其灵敏性易受故障位置和过渡电阻的影响。文献[13]针对中压直流电网, 提出了一种利用线路电流二阶导数快速检测直流线路故障的方法, 无需通信, 降低了时间延迟。文献[14]利用电流幅值及变化率进行保护与故障选极, 但此方法易受线路耦合的影响。因此仅单一地利用故障电流或电压电气量构成的保护, 不利于灵敏度的提高^[15]。

需要通信的保护: 利用差动保护的思想, 依靠通信^[16], 如差分电流/电压等, 比较被保护对象两侧特征量的大小, 进而判定故障发生与否, 具有良好的选择性和灵敏性^[17]。文献[18]根据母线换流器电容放电特征, 提出了主保护结合电流微分、后备保护基于过电流保护的混合保护方案, 提高了保护的可靠性, 但只适用于双端直流系统。文献[19]针对直流输电单极故障不平衡电流, 利用差动保护的思想改进判据, 实现线路分级保护, 灵敏度高, 但未对其他类型故障加以分析。文献[20]提出一种适用于柔性直流配电线路的纵联保护新方法, 对数据精度要求不高, 能应对通信延时, 但未对通信故障的情况进行讨论。文献[21]提出以传统电流差动保护

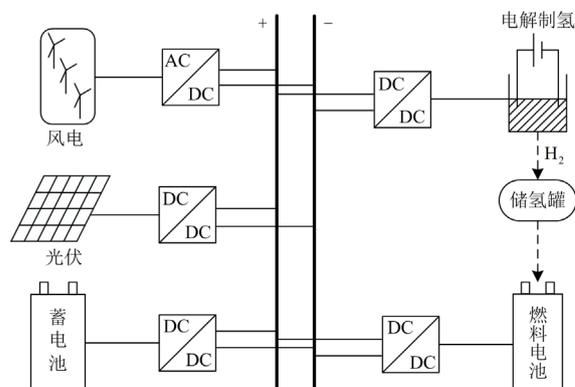
为主保护、欠电压保护为后备保护的环形直流输电系统的故障检测与保护方案, 当通信故障时, 发生高阻抗短路, 后备保护可能出现拒动。基于通信的保护虽然可靠性强、保护范围覆盖全长且抗过渡电阻能力较强, 但通信故障时主保护将失效, 若此时输电线路再发生短路故障, 系统将瘫痪。

由以上分析可知, 基于通信的保护可保护线路全长, 其速动性仍不够理想; 基于单端量的保护方法, 可实现保护的快速动作, 但可靠性较差。因此本文针对离网型直流制氢系统, 提出一种以故障瞬时功率差分变化率为主保护、利用本地功率变化率构成后备保护的协同保护方法。首先, 利用回路分析法推导短路故障电流和电压, 计算故障瞬时功率差分变化率, 加快故障检测速度; 然后, 将故障瞬时功率差分变化率与阈值进行比较以启动主保护, 再利用故障后功率差分变化率与阈值的差构造选极坐标系, 实现故障选极。与传统的方法相比, 所提出的方法可充分利用电流和电压电气量, 原理简单、故障检测速度快且结果直观明了。

1 离网型制氢系统架构及故障分析

离网型制氢系统采用与大电网相隔离的方式, 其拓扑结构主要有辐射形和环形两种, 由光伏、风电、蓄电池、制氢设备、燃料电池等几部分构成, 如图 1 所示。风光耦合发电满足电解制氢能量需求时, 将多余能量通过蓄电池或储氢罐进行储存; 当风光耦合发电供应不足时, 则利用储存的电能和氢能联合供电, 使整个电解制氢系统稳定运行, 从而提高能量的利用率。

辐射形拓扑是直流制氢系统中较为基础的结构(如图 1(a)所示), 系统各单元经直流传输线汇流于中心母线, 结构简单, 建设成本低, 但可靠性及灵活性较差。图 1(b)为环形拓扑直流制氢系统, 其所有直流端通过直流母线连接成环状, 制氢负荷可由



(a) 辐射形拓扑结构

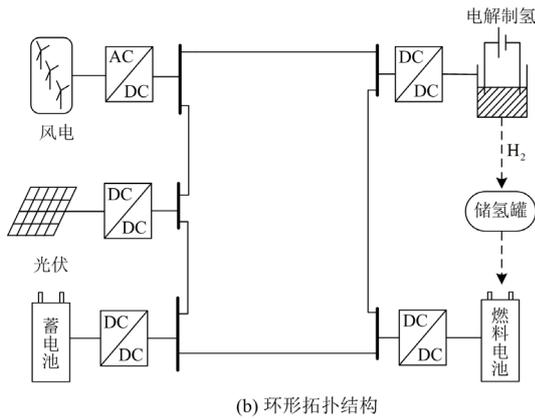


图1 离网型制氢系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of off-grid hydrogen production system

双端线路供电，增加了系统的可靠性及故障运维期间的灵活性，故采用环形直流制氢拓扑结构。

制氢系统输电线路铺设在自然环境中，极易受到外在因素影响，发生故障的概率较大^[22]，输电线路中极间短路故障和单极接地故障最为常见，在实际运行中，单极接地故障发生的频率高于极间短路故障，但极间短路故障对系统的危害更加严重^[23]。由于TN-S接地方式母线电压稳定，安全系数较高，且发生接地故障时，故障电流检测较为容易，有利于保护设备识别^[24]，因此本文离网型制氢系统采用TN-S接地方式。

1.1 母线短路故障分析

母线短路故障(F_1 、 F_2 分别为正负极接地故障， F_3 为极间短路故障)是制氢线路中最常见的故障(如图2所示)。故障发生时，母线电容放电，故障电流迅速增大，绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)立即闭锁，通过二极管续流，若故障未及时切除，过电流将烧毁二极管，同时对整个制氢系统造成严重损坏^[25]。

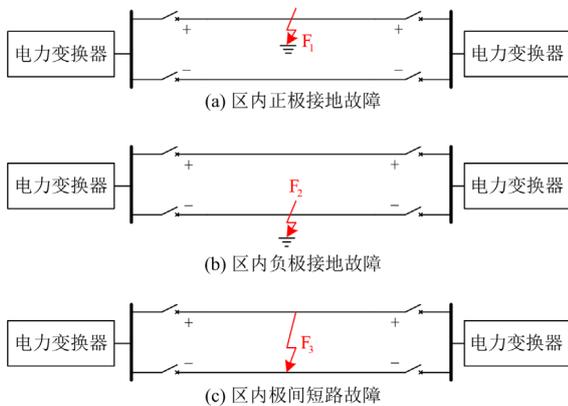


图2 母线不同故障示意图

Fig. 2 Different fault diagram of bus

制氢母线发生短路故障时，短路电流将由母线两侧汇入短路点，等效电容快速放电，输电线路电压迅速下降，同时等效微源向故障点汇入电流，导致线路电流突变，其等效电路如图3所示。图3中： u_1 、 u_2 为短路点两侧电压； i_1 、 i_2 为短路点两侧电流； i_C 、 $i_{C'}$ 为短路点两侧等效电容电流； C_1 、 C_2 为母线两侧等效电容； R_1 、 R_2 为短路点到两侧母线电阻； L_1 、 L_2 为短路点到两侧母线电感； R_f 、 i_f 分别为短路电阻和短路电流。

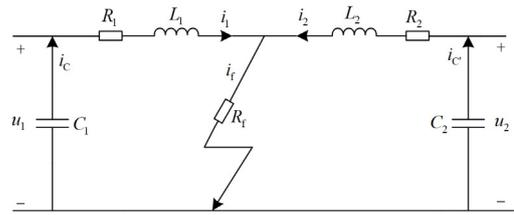
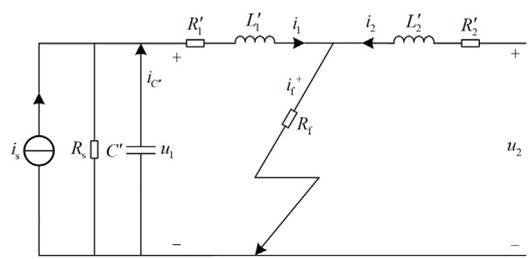


图3 母线间输电线路短路故障等效电路

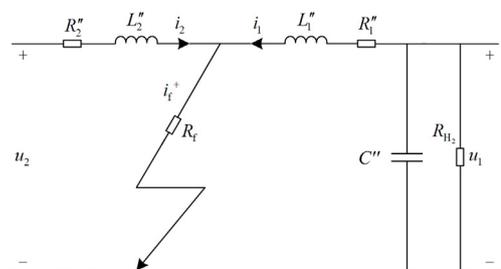
Fig. 3 Short-circuit fault equivalent circuit of interbus transmission line

1.2 支路短路故障分析

支路发生故障时，其等效电路如图4所示，其中短路故障主要包括微源(风电、光伏)、储能、燃料电池、制氢设备支路的极间短路故障和单极接地短路故障。图4(a)为微源、储能支路短路故障，其中： i_s 、 R_s 分别为微源或储能等效电流和电阻； C' 为微源侧等效电容； $i_{C'}$ 为微源或储能侧等效电容电



(a) 微源、储能支路极间短路故障



(b) 制氢支路极间短路故障

图4 各支路短路故障等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit for short-circuit fault of each branch

流; R'_1 、 R'_2 为短路点到两侧电阻; L'_1 、 L'_2 为短路点到两侧电感; i_f^+ 为正极短路故障电流。图4(b)为制氢支路短路故障, 其中: R''_1 、 R''_2 为短路点到两侧电阻; L''_1 、 L''_2 为短路点到两侧电感; C'' 为制氢负荷等效电容; R_{H_2} 为制氢负荷等效电阻。

1.3 短路电流与短路功率计算

故障瞬间各支路电流关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} i_1 + i_2 = i_f^+ \\ i_3 + i_4 = i_f^- \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_3 、 i_4 为负极短路点两侧电流; i_f^- 为负极短路故障电流。

由图3可知, 短路故障发生时, 短路点两侧分别由母线电容、线路阻感及短路电阻构成二阶振荡电路, 满足KVL电压方程, 如式(2)所示。

$$\begin{cases} L_1 C_1 \frac{d^2 u_1}{dt^2} + (R_1 + R_f) C_1 \frac{du_1}{dt} + u_1 = 0 \\ L_2 C_2 \frac{d^2 u_2}{dt^2} + (R_2 + R_f) C_2 \frac{du_2}{dt} + u_2 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)求得等效电容电压为

$$u_1(t) = \frac{u_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) - \frac{i_0}{\omega C_{eq}} e^{-\delta t} \sin(\omega t) \quad (3)$$

式中: u_0 、 i_0 分别为故障前的直流母线电压、电流值; C_{eq} 、 R_{eq} 、 L_{eq} 分别为母线与短路点之间的等效电容、电阻、电感值; δ 为时间常数, $\delta = R_{eq}/(2L_{eq})$; ω_0 为初始角频率, $\omega_0 = 1/\sqrt{L_{eq}C_{eq}}$; ω 为角频率, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$; β 为相位角, $\beta = \arctan(\omega/\delta)$ 。

由式(3)求得故障电流为

$$i_1(t) = \frac{u_0}{\omega L_{eq}} e^{-\delta t} \sin(\omega t) - \frac{i_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t - \beta) \quad (4)$$

一般情况下直流线路满足 $\delta^2 \ll \omega_0^2$, 则可假设 $\omega_0 = \omega$, 式(4)可化简为

$$i_1(t) = e^{-\delta t} \left[u_0 \sqrt{C_{eq}/L_{eq}} \sin(\omega t) + i_0 \cos(\omega t) \right] \quad (5)$$

再设 $\theta = \arctan(i_0 \sqrt{L_{eq}/C_{eq}}/u_0)$, 则有

$$i_1(t) = e^{-\delta t} \left[\sqrt{(C_{eq}/L_{eq})u_0^2 + i_0^2} \sin(\omega t + \theta) \right] \quad (6)$$

因此, 可由式(3)和式(6)求得短路点左侧功率为

$$p_1(t) = e^{-2\delta t} \left[u_0 \omega_0 \sin(\omega t + \beta) / \omega - i_0 \sin(\omega t) / (\omega C_{eq}) \right] \cdot \left[\sqrt{(C_{eq}/L_{eq})u_0^2 + i_0^2} \sin(\omega t + \theta) \right] \quad (7)$$

同理, 可求得短路点右侧功率 $p_2(t)$ 。

2 基于故障瞬时功率差分变化率的保护原理

要求线路保护在故障发生时做到不误动、不拒动, 能快速识别并切除故障。系统正常运行时, 线路两端的瞬时功率差分围绕一个常值轻微波动; 当故障发生时, 故障瞬时功率差分突变, 以此作为故障发生的依据。系统运行时, 线路两端的瞬时功率差分定义如式(8)所示。

$$\begin{cases} \Delta p^+ = u_1 i_1 - u_2 i_2 \\ \Delta p^- = u_1 i_3 - u_2 i_4 \end{cases} \quad (8)$$

式中, Δp^+ 、 Δp^- 分别为正极和负极瞬时功率差分。

2.1 两端瞬时功率差分变化率保护配置

基于通信的两端瞬时功率差分变化率保护配置如图5所示。首先, 在被保护线路两端安装电流、电压采集装置; 其次, 利用采集的信息求取瞬时功率差分变化率; 最后, 与动作整定值作比较, 再给直流断路器(direct current circuit breaker, DCCB)发送跳闸信号。

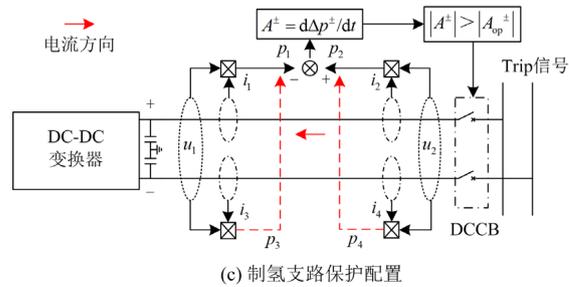
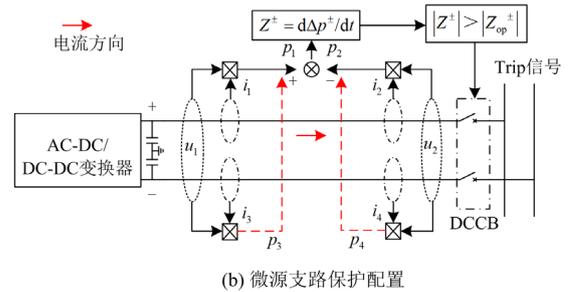
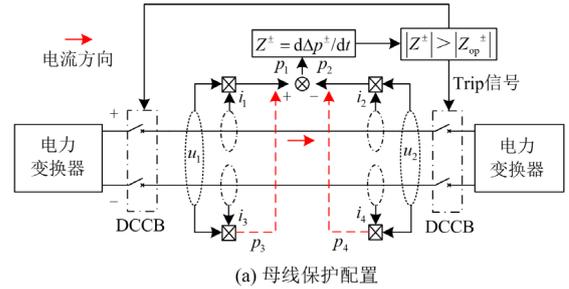


图5 制氢线路各保护配置

Fig. 5 Protection configuration of hydrogen production line

图 5 中: Z^\pm 为母线、微源支路两端瞬时功率差分变化率; A^\pm 为制氢支路两端瞬时功率差分变化率; A_{op}^\pm 为制氢支路瞬时功率差分变化率启动值。考虑保护配置的可靠性, 需快速切除故障, 其阈值应能识别正常运行时制氢负荷投切引起的最大功率差分变化率。即

$$Z_{op}^\pm = K \frac{d\Delta p_{max}^\pm}{dt} \quad (9)$$

式中: Z_{op}^\pm 为母线或微源支路瞬时功率差分变化率启动值; K 为母线或微源支路保护可靠系数, 考虑直流制氢负荷特性较交流系统波动更大^[26], 取值为 2; Δp_{max}^\pm 为保护线路两端最大功率差分。

此外, 保护应能识别最小故障电流, 在高阻抗接地短路时应具有足够的灵敏性, 有

$$\frac{Z_{min}^\pm}{Z_{op}^\pm} > K_{sen} \quad (10)$$

式中: Z_{min}^\pm 为最小故障电流时功率差分变化率差动值; K_{sen} 为母线或微源支路保护灵敏系数, 取值为 1.3。

设母线、微源支路的动作判据为

$$\begin{cases} Z_\gamma^+ = \frac{d\Delta p^+}{dt} - Z_{op}^+ > 0 \\ Z_\gamma^- = \frac{d\Delta p^-}{dt} - Z_{op}^- < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, Z_γ^+ 、 Z_γ^- 分别为母线或微源支路正极和负极短路故障动作判据。

考虑到制氢负荷到母线间有一定的损耗, 根据国家电力行业标准规定, 在配电系统中, 直流母线至负荷允许的压差为 $\pm 7\%$ ^[27], A_{op}^\pm 应该躲开正常运行时的被保护线路首末两端瞬时功率差分变化率的最大值。

$$A_{op}^\pm = K' \frac{d\Delta p_{max}^\pm}{dt} = \pm K' \frac{d(u_2 i_2 - 0.93 u_2 i_1)}{dt} \quad (12)$$

式中, K' 为制氢支路保护可靠系数, 取值为 1.5。为防止保护拒动, 当发生高阻抗单极接地时也能准确识别故障, 则有

$$\frac{A_{min}^\pm}{A_{op}^\pm} > K'_{sen} \quad (13)$$

式中: K'_{sen} 为制氢支路保护灵敏系数, 本文取值 1.3; A_{min}^\pm 为识别发生短路故障时最小瞬时功率差分变化率。

设制氢支路的动作判据为

$$\begin{cases} A_\gamma^+ = \frac{d\Delta p^+}{dt} - A_{op}^+ < 0 \\ A_\gamma^- = \frac{d\Delta p^-}{dt} - A_{op}^- > 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中, A_γ^+ 、 A_γ^- 分别为制氢支路正极和负极短路故障动作判据。

2.2 故障性质识别方法

设制氢系统输电线路足够长, u_1 、 u_2 之间存在电压降。故障瞬间, 基于式(8)、式(11)和式(14)作如下分析。

母线或微源支路保护:

工况一, 正常运行、区外故障时, $i_1 = i_2 > 0$, $i_3 = i_4 < 0$, $u_1 > u_2$, $Z_\gamma^+ < 0$, $Z_\gamma^- > 0$, 保护不动作;

工况二, 正极故障时, $i_1 > 0$, $i_2 < 0$, $i_3 = i_4$, $u_1 > u_2$, $Z_\gamma^+ > 0$, $Z_\gamma^- > 0$, 保护动作;

工况三, 负极故障时, $i_1 = i_2$, $i_3 < 0$, $i_4 > 0$, $u_1 > u_2$, $Z_\gamma^+ < 0$, $Z_\gamma^- < 0$, 保护动作;

工况四, 极间故障时, $i_1 \approx -i_2 > 0$, $i_3 \approx -i_4 < 0$, $u_1 > u_2$, $Z_\gamma^+ > 0$, $Z_\gamma^- < 0$, 保护动作。

制氢支路保护:

工况一, 正常运行、区外故障时, $i_1 = i_2 > 0$, $i_3 = i_4 < 0$, $u_1 < u_2$, $A_\gamma^+ > 0$, $A_\gamma^- < 0$, 保护不动作;

工况二, 支路正极接地故障时, $i_2 > i_1 > 0$, $i_3 = i_4$, $u_1 < u_2$, $A_\gamma^+ < 0$, $A_\gamma^- < 0$, 保护动作;

工况三, 支路负极接地故障时, $i_1 = i_2$, $i_4 < i_3 < 0$, $u_1 < u_2$, $A_\gamma^+ > 0$, $A_\gamma^- > 0$, 保护动作;

工况四, 支路极间短路故障时, $i_1 = -i_3 < 0$, $i_2 = -i_4 > 0$, $u_1 < u_2$, $A_\gamma^+ < 0$, $A_\gamma^- > 0$, 保护动作。

基于上述分析, 可利用故障后功率差分变化率与阈值的差实现故障选极。以保护线路的正极故障动作判据 Z_γ^+ 、 A_γ^+ 为横坐标, 负极故障动作判据 Z_γ^- 、 A_γ^- 为纵坐标, 构建故障选极坐标系, 如图 6 所示。由图 6(a)可以看出: 母线或微源的 Z_γ^\pm 轨迹落在第二象限时, 保护不动作; 母线或微源的 Z_γ^\pm 轨迹落在第一、三、四象限时, 分别发生正极、负极、极间短路故障, 保护动作。相反, 由于制氢支路电流流向和首末两端电压大小发生了改变, 由图 6(b)可以看出: 制氢支路的 A_γ^\pm 轨迹落在第四象限时, 保护不动作; 制氢支路的 A_γ^\pm 轨迹落在第一、二、三象限时, 分别发生负极、极间、正极短路故障, 保护动作。

为避免故障后性质误识别, 依据落入构建的故

障选极坐标系的轨迹点个数来判别故障性质, 拟采用 1 ms 数据窗口内的采样点, 设落入故障选极坐标系象限区域内的采样点个数 M 与 1 ms 数据窗口内所有采样数据 M_s 的比值为 ε ^[28], 当 ε 大于一定值时, 则认为 Z_γ^\pm 、 A_γ^\pm 轨迹落在该故障选择区域, 实现故障性质识别。

$$\varepsilon = S \frac{M}{M_s} \geq 0.5 \quad (15)$$

式中, S 为采样数据可靠系数, 取值为 1.1^[29]。保护采样频率设置为 1 MHz, 1 ms 数据窗口内采样点总数为 18, 根据式(15)和 2.2 节分析可得, 当落入故障选择区域的采样点至少为 8 时, 则实现故障性质判别。

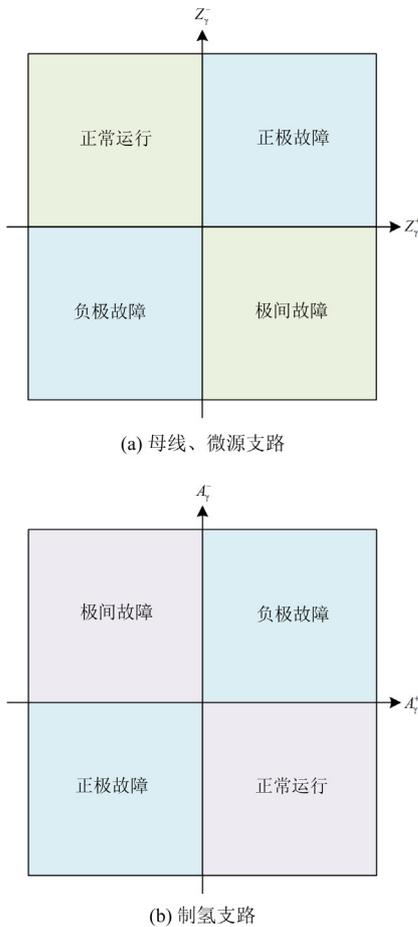


图 6 不同线路故障选极判据

Fig. 6 Fault pole selection criteria for different lines

3 基于本地故障瞬时功率变化率的后备保护

当主保护通信缺失或者拒动时, 为防止过电流对系统造成严重的损坏, 还需配备必要的后备保护。因此, 使用本地瞬时功率变化率构成后备保护, 不依赖通信, 只需与本地故障瞬时功率变化率阈值对比, 判断故障发生与否。

其动作阈值为

$$\Delta p_{\text{load}}^\pm \geq T \left(\frac{dP_{\text{max}}^\pm}{dt} \right) \quad (16)$$

式中: $\Delta p_{\text{load}}^\pm$ 为本地瞬时功率变化率动作启动值; T 为本地瞬时功率变化率保护可靠系数, 取 1.5^[26]; P_{max}^\pm 为最大制氢功率。

此外, 当通信故障时, 本地故障瞬时功率变化率保护应具有足够的灵敏度, 能够识别最小故障电流, 即在高阻抗接地短路时应具有足够的灵敏性, 则有

$$\frac{\Delta P_{f,\text{min}}^\pm}{\Delta P_{\text{load}}^\pm} > T_{\text{sen}} \quad (17)$$

式中: $\Delta P_{f,\text{min}}^\pm$ 为最小故障电流时的功率变化率; T_{sen} 为本地瞬时功率变化率保护灵敏系数, 取值 1.3^[10]。

综上所述, 离网型制氢系统线路协同保护方法流程如图 7 所示。

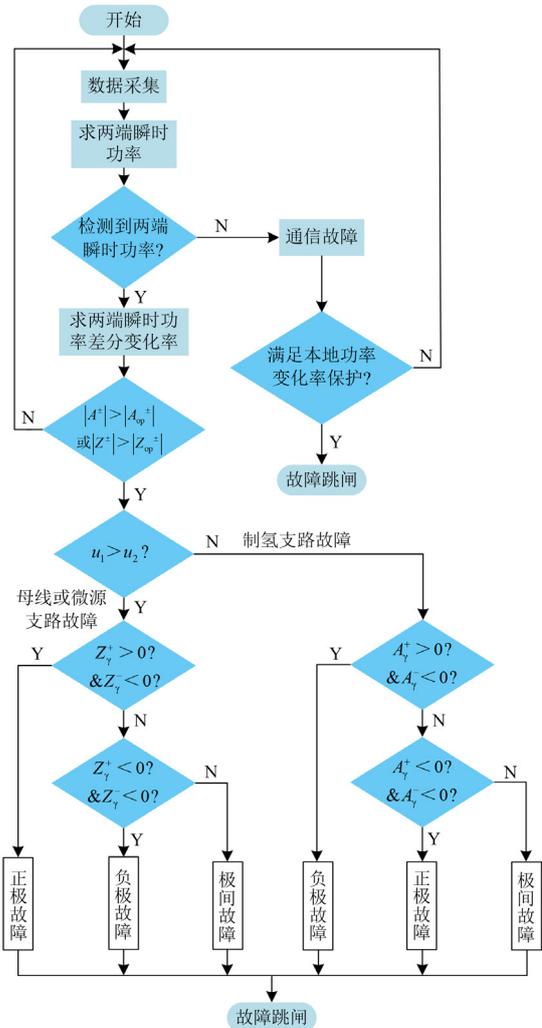


图 7 协同保护方法流程图

Fig. 7 Flowchart of the synergistic protection method

4 仿真验证

为验证所提离网型制氢系统协同保护的有效性，基于 Matlab2023a/Simulink 搭建如图 1(b)所示模型。具体参数如表 1 所示。

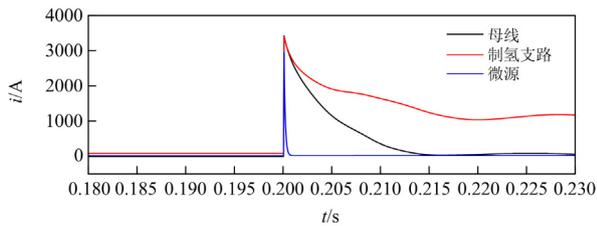
表 1 直流制氢系统参数

参数	数值
直流母线电压/V	800
风电机组输出功率/kW	20
光伏阵列输出功率/kW	18
蓄电池组输出功率/kW	20
直流制氢额定功率/kW	65
燃料电池额定功率/kW	12
线路等效电感/(mH/km)	0.56
线路等效电阻/(Ω/km)	0.112

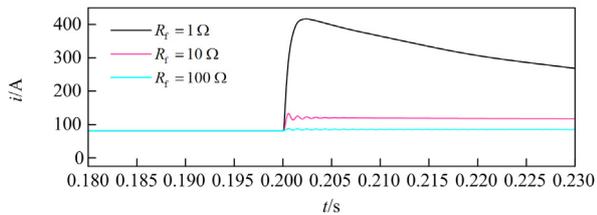
4.1 无保护时系统故障运行特性

仿真初始时刻系统处于稳定状态，直流电流仅有小幅波动。仿真 0.2 s 时系统发生极间短路故障 ($R_f = 0.01 \Omega$)，如图 8(a)所示，尽管故障发生在不同位置，故障电流都将在极短时间内上升至 3000 A 左右，为稳态时的 37.5 倍。若不及时切除故障，过电流将在极短时间内烧毁设备。

当发生单极接地故障时，不同的过渡电阻会对系统造成不同的影响(如图 8(b)所示)。由图可知，当发生高阻抗接地时，线路中的电流幅值仅有小幅度波动，这将导致故障的识别和切除变得困难，因此要求输电线路保护具有识别高阻抗接地电流的能力。



(a) 不同线路极间故障电流



(b) 不同过渡电阻单极短路电流

图 8 无保护时不同位置故障电流

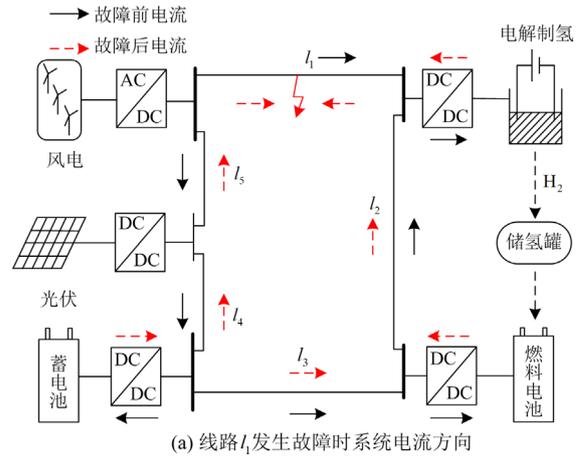
Fig. 8 Fault currents at different locations without protection

4.2 保护作用时系统运行特性

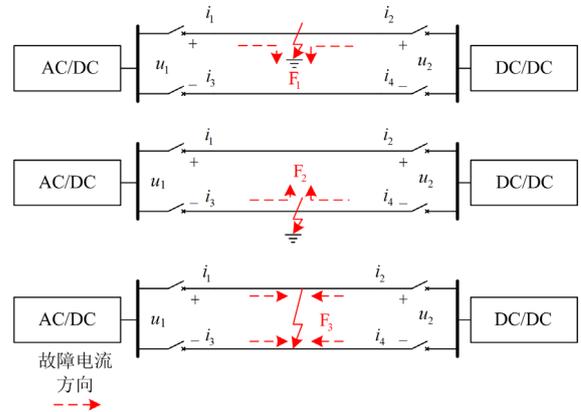
以下将对所提保护方法进行性能对比分析，验证其在不同工况的可行性。

4.2.1 保护灵敏性及速动性验证

以传统的过电流保护作对比：以 l_1 (10 km)线路故障为例，如图 9(a)所示，其不同类型故障电流流向如图 9(b)所示，过电流保护的阈值需要躲过制氢设备最大投切容量所产生的电流。



(a) 线路 l_1 发生故障时系统电流方向



(b) 不同类型故障电流流向示意图

图 9 母线故障仿真模型

Fig. 9 Bus fault simulation model

过电流保护动作阈值为

$$I_{op} = K_{rel} \frac{P_{max}}{U_n} = 122 \text{ A} \quad (18)$$

式中： K_{rel} 为过电流保护可靠系数，取值为 1.5； P_{max} 为制氢系统最大运行功率； U_n 为额定电压。

根据图 4(b)可求得过电流保护可识别过渡电阻的范围为

$$I_{op} < \frac{u_{min}}{R_2'' + R_f // R_{H_2}} \quad (19)$$

由式(12)可知， $u_{min} = 0.93u_2$ 为母线至负荷最小

运行电压, 再根据式(19)求得 $R_f < 16 \Omega$ 。

母线在 0.2 s 时发生正极高阻抗接地故障 $F_1(R_f = 20 \Omega)$, 由图 10 可知, 其故障电流最大值小于过电流保护阈值, 因此发生了拒动。考虑通信延时与直流断路器机械特性, 其动作延时设置为 1 ms, 稳态时, 由式(9)和式(10)求得 Z_{op}^+ 约为 $1 \times 10^{17} \text{ W/s}$; 故障瞬时, 仿真计算瞬时功率差分变化率可达到 $3.2 \times 10^{18} \text{ W/s}$, 大于启动值, 因而在短路故障发生 1.1 ms 后, 功率差分变化率保护故障线路两端断路器动作并隔离线路 l_1 , 具有较高的灵敏性和速动性。

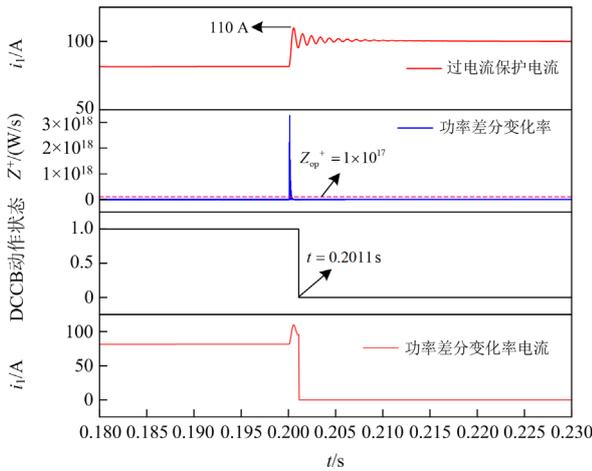


图 10 通信正常, 线路接高电阻不同保护情况

Fig. 10 Communication is normal, different protection conditions when the line is connected to the high resistance

为进一步验证主保护切除故障速度的优越性, 与其他 3 种直流微网保护方法的比较见表 2。

表 2 4 种主保护方法性能对比

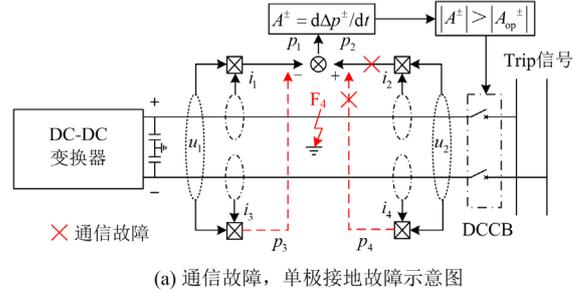
Table 2 Performance comparison of 4 main protection methods

保护方法	故障切除时间/ms	
	极间短路	单极短路
基于暂态故障电流变化率绝对值的反时限保护 ^[11]	3.2	5.2
电流差动保护 ^[21]	2.6	—
基于支路两端导纳差值导数保护 ^[17]	—	0.195
本文主保护	0.1	0.1

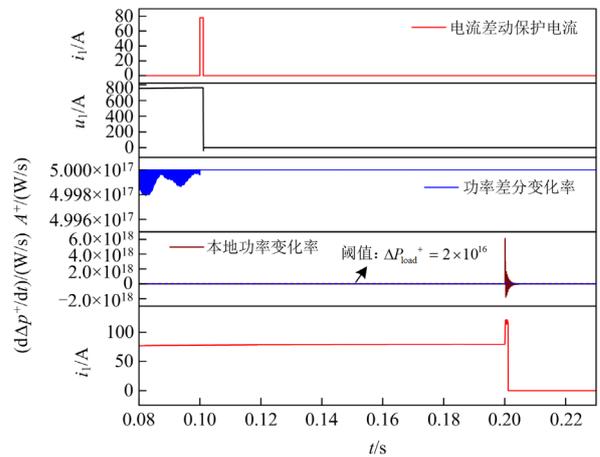
4.2.2 保护可靠性验证

如图 11(a)所示, 在 0.1 s 时系统制氢支路(1 km)处主保护通信故障。0.2 s 时系统发生正极短路故障 $F_4(R_f = 10 \Omega)$, 因未收到对侧功率数据, 主保护闭锁。与电流差动保护相比, 其仿真结果如图 11(b)所示, 当 0.1 s 通信故障时, 电流差动保护因未收到线路两侧的电流量, 导致差动电流大于阈值, 保护误动

作, 电压 u_1 降为 0。而协同保护策略在主保护闭锁后, 后备保护启动。稳态时, 由式(16)和式(17)求得本地功率变化率阈值 ΔP_{load}^+ 约为 $2 \times 10^{16} \text{ W/s}$, 在 0.2 s 发生单极接地短路故障时, 本地瞬时功率变化率仿真计算结果为 $6 \times 10^{18} \text{ W/s}$, 远大于动作阈值, 可准确识别并切除故障, 具有较高的可靠性。



(a) 通信故障, 单极接地故障示意图



(b) 通信故障, 不同保护动作情况

图 11 通信故障协同保护策略动作情况

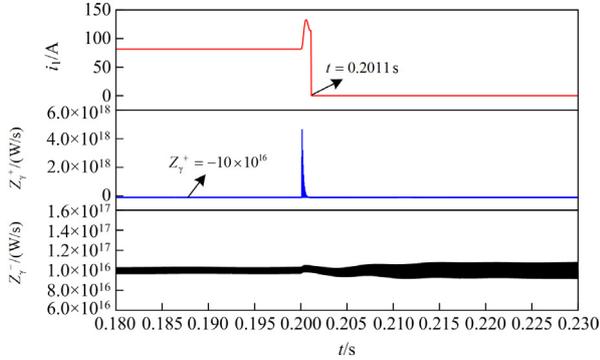
Fig. 11 Action situation of communication fault cooperative protection strategy

4.2.3 保护选择性验证

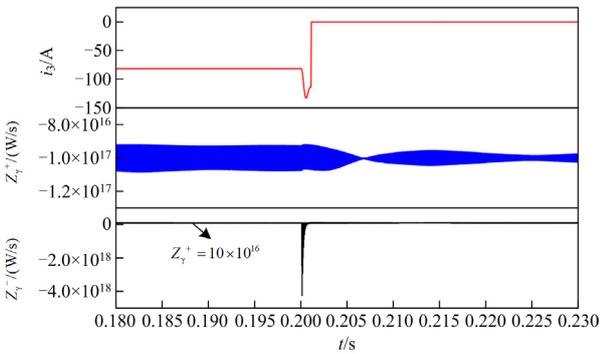
母线 l_1 在 0.2 s 时分别发生正极、负极、极间短路故障 $F_1(R_f = 10 \Omega)$ 、 $F_2(R_f = 10 \Omega)$ 、 $F_3(R_f = 0.01 \Omega)$, 其仿真结果如图 12 所示。图 12(a)中, 当发生正极故障时, Z_{γ}^+ 在短路后 0.1 ms 时由负突变为正, 保护延时 1 ms 动作, 而 Z_{γ}^- 仅有轻微波动(恒大于 0); 同理, 当发生负极故障时, 图 12(b)中, Z_{γ}^- 在短路后 0.1 ms 时由正突变为负, 而 Z_{γ}^+ 仅有轻微波动(恒小于 0), 由此实现了故障选极。

考虑到启动设备会出现暂态过电流, 从而导致主保护出现误动的情况。图 13 中, 制氢负荷从停机增加至额定功率, 电流 i_2 在投入设备时都出现了电

流突增情况。稳态时,由式(12)和式(13)求得 A_{op}^{\pm} 约为 $\pm 5 \times 10^{17}(\text{W/s})$; 启动设备时,瞬时功率差变化率 $(d\Delta p^{\pm}/dt)$ 随时间虽出现波动,但波动值恒小于其启动值,故不动作,具有良好的选择性。



(a) 正极故障



(b) 负极故障

图 12 通信正常,不同极性故障瞬时功率 Z_{γ}^{\pm} 变化率情况

Fig. 12 Communication is normal, different polarity fault instantaneous power Z_{γ}^{\pm} change rate

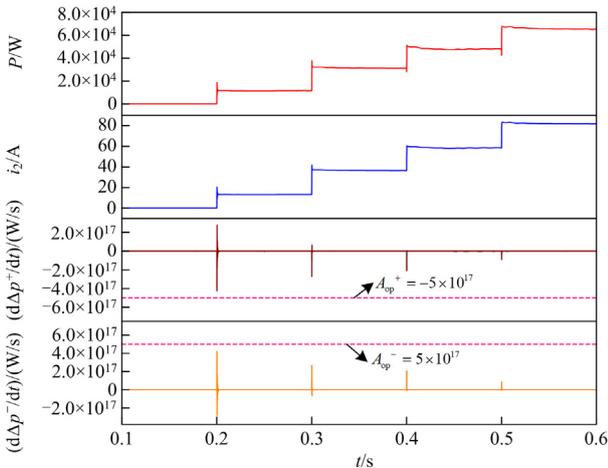


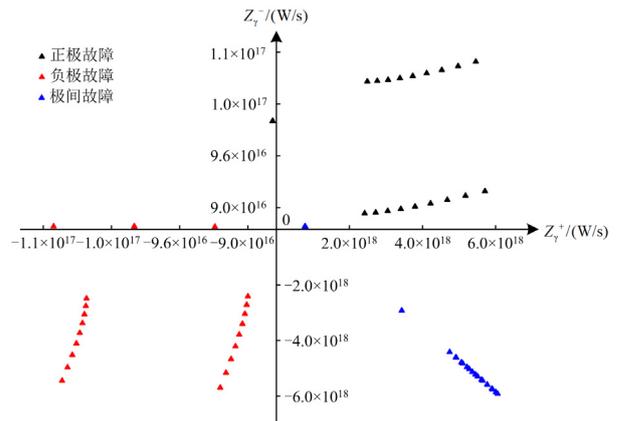
图 13 制氢负荷波动 $(d\Delta p^{\pm}/dt)$ 随时间变化情况

Fig. 13 Hydrogen production load fluctuation $(d\Delta p^{\pm}/dt)$ changes with time

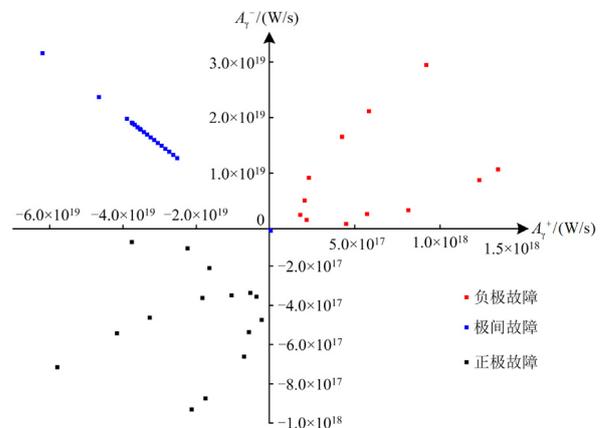
4.2.4 保护故障性质识别验证

将母线 l_1 发生 $F_1(R_f = 1\Omega)$ 、 $F_2(R_f = 1\Omega)$ 、 $F_3(R_f = 0.01\Omega)$ 故障后 1 ms 时间窗内不同故障情况下 Z_{γ}^{\pm} 的轨迹,绘制在如图 14 所示的故障选极坐标系中。从图 14(a)中可知,当发生正极接地故障时,线路 l_1 两侧的正负极 Z_{γ}^{\pm} 均为正,轨迹位于故障选极坐标系的第一象限,正极保护启动;当发生负极接地短路故障时,线路 l_1 两侧的正负极 Z_{γ}^{\pm} 均为负,轨迹位于故障选极坐标系的第三象限,负极保护启动;当发生极间短路故障时,线路 l_1 两侧的正负极 Z_{γ}^+ 和 Z_{γ}^- 分别为一正一负,轨迹位于故障选极坐标系的第四象限,正负极线路保护都将启动。

同理,制氢支路在发生不同故障(正极、负极、极间短路)后的 A_{γ}^{\pm} 轨迹绘制如图 14(b)所示。由于制氢支路首末两端电压大小发生了变化,因此 A_{γ}^{\pm} 轨迹极性位置出现了对换,这验证了所提出的基于



(a) 母线发生不同类型故障的识别结果



(b) 制氢支路发生不同类型故障的识别结果

图 14 不同支路的故障类型识别结果

Fig. 14 Fault type identification results of different branches

故障瞬时功率差分变化率保护方法的故障性质识别的可行性。

综上所述, 所提协同保护策略满足继电保护所要求的速动性、灵敏性、选择性和可靠性, 可在故障 1 ms 内识别故障性质, 解决了因通信缺失所引起的主保护拒动问题, 且不受负荷波动的影响。

5 结论

针对离网型制氢系统, 通信正常时, 充分利用线路两端电流和电压电气量, 提出计算故障瞬时功率差分变化率, 并以此为判据与整定值作比较。此方法可快速识别短路故障同时判断故障性质, 且能保证制氢设备正常投切不误动, 考虑通信故障会导致主保护失效, 本地功率变化率构成后备保护, 解决了通信故障的问题, 缩小了停电范围, 提高了供电可靠性。

本文着重研究了离网型制氢系统各支路短路保护的有效性, 对于制氢系统输电线路故障定位方面尚需进一步研究。

参考文献

- [1] 周京华, 孟祥飞, 陈亚爱, 等. 基于新能源发电的电解水制氢直流电源研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 389-397.
ZHOU Jinghua, MENG Xiangfei, CHEN Yaai, et al. Research on DC power supply for hydrogen production from electrolytic water based on new energy generation[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(6): 389-397.
- [2] 李争, 张蕊, 孙鹤旭, 等. 可再生能源多能互补制-储-运氢关键技术综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 446-462.
LI Zheng, ZHANG Rui, SUN Hexu, et al. Review on key technologies of hydrogen generation, storage and transportation based on multi-energy complementary renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 446-462.
- [3] 潘光胜, 顾钟凡, 罗恩博, 等. 新型电力系统背景下的电制氢技术分析与展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 1-13.
PAN Guangsheng, GU Zhongfan, LUO Enbo, et al. Analysis and prospect of electrolytic hydrogen technology under background of new power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 1-13.
- [4] 曹蕃, 郭婷婷, 陈坤洋, 等. 风电耦合制氢技术进展与发展前景[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2187-2201.
CAO Fan, GUO Tingting, CHEN Kunyang, et al. Progress and development prospect of coupled wind and hydrogen systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2187-2201.
- [5] 郑博, 白章, 袁宇, 等. 多类型电解协同的风光互补制氢系统与容量优化[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8486-8496.
ZHENG Bo, BAI Zhang, YUAN Yu, et al. Hydrogen production system and capacity optimization based on synergistic operation with multi-type electrolyzers under wind-solar power[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8486-8496.
- [6] BHARGAV R, BHALJA B R, GUPTA C P. Novel fault detection and localization algorithm for low-voltage DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(7): 4498-4511.
- [7] 缪希仁, 唐玲玲, 庄胜斌, 等. 低压配电系统短路故障保护方法综述[J]. 电器与能效管理技术, 2019(15): 21-29.
MIAO Xiren, TANG Lingling, ZHUANG Shengbin, et al. Review of short circuit fault protection methods in low voltage distribution system[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(15): 21-29.
- [8] 杨志勇, 杨炳元, 任永峰, 等. 基于单端高频电流量的 MMC-MTDC 输电线路保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 151-160.
YANG Zhiyong, YANG Bingyuan, REN Yongfeng, et al. Transmission line protection scheme of MMC-MTDC based on single terminal high frequency current[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 151-160.
- [9] 陈田田, 赵振廷, 李银红. 不依赖边界元件的柔性直流电网反时限过流保护配置方案[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 48-58.
CHEN Tiantian, ZHAO Zhenting, LI Yinhong. Inverse time overcurrent protection configuration scheme for a flexible DC power grid independent of boundary components[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 48-58.
- [10] MEGHWANI A, SRIVASTAVA S C, CHAKRABARTI S. A non-unit protection scheme for DC microgrid based on local measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 32(1): 172-181.
- [11] 刘鑫蕊, 谢志远, 孙秋野, 等. 低压双极性直流微网故障分析及保护方案[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 749-755.
LIU Xinrui, XIE Zhiyuan, SUN Qiuye, et al. Fault analysis and protection for LV bipolar DC microgrid[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 749-755.
- [12] 高本锋, 董沛毅, 刘辛晔, 等. 高压直流输电线路微分欠压保护特性与定值整定[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2303-2311.
GAO Benfeng, DONG Peiyi, LIU Xinye, et al. Research of HVDC transmission line differential under-voltage protection characteristics and value setting[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2303-2311.
- [13] 王盼宝, 孙红梅, 郝鑫, 等. 基于线路电流二阶导数的中压直流系统故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 1-13.
WANG Panbao, SUN Hongmei, HAO Xin, et al. DC line fault identification scheme for a medium-voltage DC power system based on the second derivative of line current[J].

- Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 1-13.
- [14] LIU L, LIU Z, POPOV M, et al. A fast protection of multi-terminal HVDC system based on transient signal detection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 43-51.
- [15] 张伟亮, 张辉, 支娜, 等. 放射直流微电网短路故障保护策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 203-209.
ZHANG Weiliang, ZHANG Hui, ZHI Na, et al. Protection strategy of short circuit fault in radial DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 203-209.
- [16] 郭家浩, 樊艳芳, 侯俊杰. 基于电流行波突变特性的多端柔性直流线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 31-42.
GUO Jiahao, FAN Yanfang, HOU Junjie. Pilot protection method for multi terminal flexible DC lines based on current traveling wave mutation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 31-42.
- [17] 张伟亮, 张辉, 支娜, 等. 基于功率梯度考虑通信故障的直流微电网群协同保护策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4590-4600.
ZHANG Weiliang, ZHANG Hui, ZHI Na, et al. Collaborative protection strategy for DC multi-microgrid based on power gradient considering communication failures[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4590-4600.
- [18] 周嘉阳, 李凤婷, 陈伟伟, 等. 基于电容放电特征的柔性直流配电网线路保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 42-48.
ZHOU Jiayang, LI Fengting, CHEN Weiwei, et al. Line protection schemes for flexible DC distribution network based on capacitor discharge[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 42-48.
- [19] 褚旭, 孙锦琛. 直流输电线路单极故障不平衡电流分析及差动保护改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 47-56.
CHU Xu, SUN Jinchun. Analysis of single-pole fault unbalanced current and improvement of a differential protection scheme for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 47-56.
- [20] 张鑫宇, 樊艳芳, 马健, 等. 基于拟合电流斜率特性的柔性直流配电网线路纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 128-136.
ZHANG Xinyu, FAN Yanfang, MA Jian, et al. Pilot protection method for flexible DC distribution lines based on fitted current slope characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 128-136.
- [21] 王毅, 于明, 张丽荣. 环形直流微电网短路故障分析及保护方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 7-14.
WANG Yi, YU Ming, ZHANG Lirong. Short circuit fault analysis and protection scheme for looped DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 7-14.
- [22] 马为民, 吴方劫, 杨一鸣, 等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2429-2439.
MA Weimin, WU Fangjie, YANG Yiming, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2429-2439.
- [23] 李俊洁, 刘毅力, 沈志雨, 等. 一种适用于直流微网的电流差动保护[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 55-63.
LI Jiaojie, LIU Yili, SHEN Zhiyu, et al. Research on a current differential protection suitable for DC microgrid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 55-63.
- [24] 薛士敏, 李蒸, 刘存甲, 等. 直流微网接地综述与基于控保协同的保护方法研究初探[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2255-2269.
XUE Shimin, LI Zheng, LIU Cunjia, et al. Review of DC microgrids grounding and study on protection methods based on control and protection cooperation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2255-2269.
- [25] 张伟亮, 张辉, 支娜, 等. 环形直流微电网故障分析与保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 105-110.
ZHANG Weiliang, ZHANG Hui, ZHI Na, et al. Fault analysis and protection of ring DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 105-110.
- [26] MOHANTY R, PRADHAN A K. Protection of smart DC microgrid with ring configuration using parameter estimation approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6328-6337.
- [27] 同向前, 余建明, 苏文成, 等. 供电技术[M]. 5版. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [28] 倪静怡. 基于瞬时电流和功率相平面的柔性直流电网线路保护研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
NI Jingyi. Study on line protection of flexible DC grid based on instantaneous current and power phase plane[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [29] 王洪彬, 周念成, 廖建权, 等. 基于瞬时功率相平面的柔性直流电网后备保护[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 1273-1283.
WANG Hongbin, ZHOU Niancheng, LIAO Jianquan, et al. VSC-HVDC backup protection based on instantaneous power phase plane[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1273-1283.

收稿日期: 2024-01-11; 修回日期: 2024-04-13

作者简介:

赵东(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 983434581@qq.com

何山(1974—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为可再生能源发电与并网控制。E-mail: 2513041660@qq.com

(编辑 魏小丽)