

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240655

## 适用于双端弱馈交流系统的改进型电流差动保护

高强强<sup>1</sup>, 侯俊杰<sup>1</sup>, 樊艳芳<sup>1</sup>, 宋国兵<sup>1,2</sup>, 曹润彬<sup>3</sup>, 李岩<sup>3</sup>, 黄伟煌<sup>3</sup>, 吴小芳<sup>4</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 711049;  
3. 直流输电技术全国重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司), 广东 广州 510663;  
4. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 新能源经柔直送出工程成为规模化新能源并网的必然发展趋势, 其双端弱馈交流系统往往由100%电力电子型电力设备组成, 线路两端换流器故障后采取的传统故障控制策略使得故障电流受限, 导致传统电流差动保护性能降低。在结合传统控制策略下双端弱馈交流系统电流差动保护问题的基础上, 提出一种基于负序协同控制策略的双端弱馈交流系统电流差动保护方案。首先, 从理论上推导了双端弱馈交流系统的故障特征, 给出了能够量化电流差动保护动作性能的边界函数。其次, 结合改进型故障控制协同策略分析了控制策略改进后电流差动保护的边界及其灵敏度。最后, 结合动作边界、灵敏度和自适应校正函数, 提出了基于自适应校正函数的双端弱馈交流系统改进型电流差动保护方案。仿真结果表明, 所提保护方案在过渡电阻为300 Ω和25 dB噪声干扰下均能够可靠识别故障, 能够适应双端弱馈交流系统不同场景下的保护需求且具有更高的灵敏度。

**关键词:** 双端弱馈交流系统; 电流差动保护; 负序控制策略; 自适应校正函数; 灵敏度

### Improved current differential protection for two-terminal weak feed AC system

GAO Qiangqiang<sup>1</sup>, HOU Junjie<sup>1</sup>, FAN Yanfang<sup>1</sup>, SONG Guobing<sup>1,2</sup>, CAO Runbin<sup>3</sup>, LI Yan<sup>3</sup>, HUANG Weihuang<sup>3</sup>, WU Xiaofang<sup>4</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 711049, China; 3. State Key Laboratory of HVDC (Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid), Guangzhou 510663, China; 4. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

**Abstract:** The transmission of renewable energy via flexible DC systems has become an inevitable development trend for large-scale renewable energy grid integration. The associated two-terminal weak feed (TTWF) AC systems are often composed of 100% power electronic equipment. Traditional fault control strategies adopted by the converters at both ends of the line after a fault lead to limited fault currents, thereby reducing the effectiveness of conventional differential protection. Based on the challenges in current differential protection in TTWF AC systems under conventional control strategies, a current differential protection scheme based on negative-sequence control coordination strategy is proposed. First, the fault characteristics of TTWF AC systems are theoretically derived, and a boundary function is presented to quantitatively assess the performance of current differential protection actions. Secondly, the action boundary and sensitivity of current differential protection with the improved fault control coordination strategy are analyzed. Finally, combining the action boundary, sensitivity and adaptive function, an improved current differential protection scheme based on adaptive function is proposed. Simulation results show that the proposed protection scheme can reliably identify faults even under conditions of a 300 Ω fault resistance and 25 dB noise interference. It is well-suited for the protection requirements of TTWF AC systems under various scenarios and demonstrates higher sensitivity.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB1507000).

**Key words:** two-terminal weak feed AC system; current differential protection; negative-sequence control strategy; adaptive correction function; sensitivity

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2021YFB1507000); 南网科研院科技项目资助(SEPRI-K22B055); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目资助(2022D01C662); “天山英才培养”计划项目资助(2022TSYCLJ0019)

## 0 引言

伴随“十四五”规划对我国能源行业提出的要求,以南澳多端、如东海风、青州五/七柔直等典型工程为代表的大规模新能源经柔直送出工程不断涌现,使得新能源装机容量快速升高,新兴的发电技术也得到了迅速发展<sup>[1-3]</sup>。由于电力电子器件自身优势使其在新能源发电生产过程中被大量地运用。因此电力系统逐渐呈现出高比例新能源、高比例电力电子的基本特征<sup>[4-7]</sup>。但高比例电力电子化的双端弱馈交流系统具有弱支撑性和低抗扰性等特征,导致双端弱馈交流系统故障后故障特征发生了本质转变<sup>[8-10]</sup>,这将极大地影响基于同步机故障特征的传统保护性能。因此,亟需分析双端弱馈交流系统的故障特征并研究适用于双端弱馈交流系统线路保护的新原理,这对提升双端弱馈交流系统稳定与可靠运行具有重要的理论和工程意义。

电流差动保护因其具有高可靠性、高灵敏度的优点,常作为 220 kV 及以上电压等级线路保护的主保护。研究电流差动保护在双端弱馈交流系统中的适应性并提出适用于双端弱馈交流系统线路保护的新型差动保护原理,对于提高新能源利用效率、保证电网安全运行具有重要作用<sup>[10]</sup>。目前,针对双端弱馈交流系统线路中的核心设备——模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的工作原理、基本控制策略的研究均已比较成熟<sup>[10]</sup>。针对电流差动保护在弱馈系统中的适应性,文献[11-14]从不同角度分析了抑制负序电流控制策略下电流差动保护的不适应性问题。文献[11]分析了相位差动保护受抑制负序电流控制影响,导致故障后不能消除负序电流对相位偏差造成的影响,进而使得相位差动保护性能变差。文献[12-14]分析了不对称故障复合序网故障特征并仿真分析了电流差动保护在传统负序电流抑制控制策略下的不适应性。而针对国内外诸多学者分析弱馈电源下电流差动保护的不适应问题提出的改进方案主要可分为以下两类。

第一类改进方案主要针对的是对 MMC 控制策略的利用。文献[11]提出利用抑制负序电流控制下负序网络开路的特性,通过引入旋转因子消除过渡电阻的影响,解决电流差动保护灵敏度不足的问题。文献[12]提出了一种基于相位校正的差动保护方案。利用控制策略对两侧电流相位的影响,在电流差动保护中加入附加相角进行校正,但在实际系统中两侧负序电流并不能同时抑制到 0,所以忽略负序电流的影响是不合理的。文献[13]利用换流器注入不同大小的负序电流以提高电流差动保护的适应

性,但该方案在不同系统中的实用性不足。文献[15]提出一种利用正序电流故障分量幅值比的电流差动保护方案,但弱馈电源受控制策略和电子器件自身容量的影响,导致其输出电流幅值受限,相位受控。在低电压穿越过程中无功支撑所需的无功电流由正序无功电流提供,文献[16-17]提出利用两侧相电流增量之比和正序电流增量之比互补判据判别区内故障。文献[17]在计及控制策略影响的基础上建立精确阻抗等效模型,该方案经济性好但受限于系统拓扑结构。因此,第一类改进方案主要是对控制策略的利用,但是这类改进方案对电流差动保护的动作边界、灵敏度以及保护判据的改进均没有充分考虑,因此保护性能有待进一步提升。

第二类改进方案主要针对传统电流差动保护判据的改进或者提出区别于前者的改进型差动保护方案。文献[18]考虑用故障后线路两端的电流相角信息构建判据,但该方案并不能解决由负序电流控制作用带来的短路电流小相角测量不准确的根本问题。文献[19]提出一种基于特勒根拟功率定理的电流差动保护方案。文献[20]提出增加辅助判据解决大规模新能源弱馈出力的问题,但是该方案增加了定值选取的难度。文献[21]利用故障电流的衰减直流分量和基频交流分量构成二维空间投影的双差动电流保护方案。文献[22]通过修改传统差动保护的制动面积去提高电流差动保护的灵敏度。但是通常情况下,提高区内制动面积的同时也会降低区外故障时差动保护的可靠性,并且该改进方案依旧受到通信同步误差的影响。为了降低通信同步误差的影响,文献[23]和文献[24]提出基于 5G 无线通信的差动保护方案,但是 5G 信号容易受到干扰,在网络波动剧烈时,5G 波动会严重影响到差动保护的灵敏度。综上所述,第二类改进方案主要针对电流差动保护判据的改进或者对于其他故障特征的利用,但是这种方案的普适性有待考证,并且这类改进方案没有充分考虑故障控制给保护带来的影响,对于保护动作性能提升的研究有待进一步深化。

综上所述,上述两类改进方案未能将控制策略改进和保护方案改进充分有效融合。鉴于双端弱馈交流系统的特殊性,有必要深入研究换流器在不同控制策略下的故障特征,基于换流器的故障特征改进电流差动保护的判据,以期更好地解决电流差动保护在全电力电子化的双端弱馈交流系统中存在的不适应问题。

本文以大规模新能源经柔直送出工程为背景的双端弱馈交流系统为研究对象,提出改进型负序协同控制策略。并且为提高电流差动保护的灵敏度,

在改进控制策略的基础上, 提出一种基于电流幅值自适应校正函数的高灵敏度电流差动保护方案。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中建立光伏场站经柔直送出的双端弱馈交流系统电磁暂态仿真模型, 验证了本文所提保护方案的可行性和有效性。

## 1 双端弱馈交流系统故障特征及动作边界特性分析

### 1.1 双端弱馈交流系统故障特征分析

新能源场站经汇集线路接入柔直并网系统, 交流线路两侧均为电力电子电源, 与传统风机和光伏直接接入交流系统相比, 故障特征发生了根本性变化, 这极大地影响了保护性能, 对系统安全运行造成威胁。本文参照某实际大规模新能源经柔直送出工程系统拓扑和参数, 构建大规模新能源经柔直送出双端弱馈交流系统如图 1 所示, 以研究线路电流差动保护。

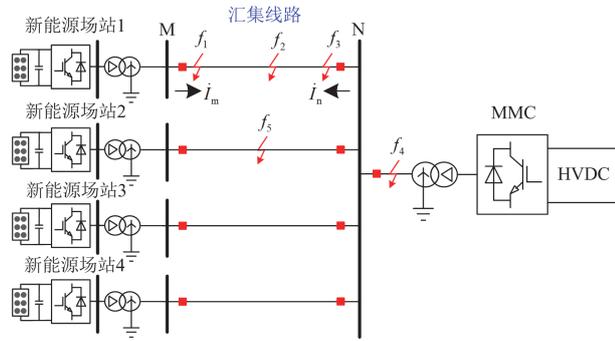


图 1 双端弱馈交流系统拓扑

Fig. 1 Topology of the two-terminal weak feed AC system

该系统光伏逆变器经升压变压器升压至 525 kV, 再经 4 条汇集线路送入到柔直换流站经高压直流送出到电网。该光伏场站由多个 1 MW 的光伏逆变器聚合而成, 功率为 2000 MW。线路全长 300 km, 在汇集交流线路不同位置设置了 5 个故障点, 区内故障设置在  $f_1$  (10%)、 $f_2$  (50%) 和  $f_3$  (90%), 区外故障设置在  $f_4$  和  $f_5$ 。

正常运行时, 光伏场站网侧换流器正序电流参考值由外环有功功率  $P_s$  和无功功率  $Q_s$  控制给定。故障后, 光伏场站短路电流大小与并网点的电压跌落深度相关, 为保证电压跌落时光伏场站不脱网运行, 新能源网侧换流器需要按照国标 GB/T 37408- 2019<sup>[25]</sup> 输出无功电流以提供无功支撑, 具体如式(1)所示。

$$\begin{cases} i_d^{+*} = \min(\sqrt{I_{\max}^2 - i_q^{+*2}}, 2P_{\text{ref}}/3U_1) \\ i_q^{+*} = 0 & U_1^* \geq 0.9 \\ i_q^{+*} \geq 1.5(0.9 - U_1^*)I_N & 0.2 \leq U_1^* < 0.9 \\ i_q^{+*} = I_{\max} & U_1^* < 0.2 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $i_d^{+*}$  和  $i_q^{+*}$  分别为正序电流在  $d$ 、 $q$  坐标系下的参考值;  $P_{\text{ref}}$  为换流器的输出功率;  $I_N$  为换流器的额定电流;  $I_{\max}$  为换流器最大耐受电流, 其一般为额定电流的 1.2~2 倍;  $U_1$  为换流站公共连接点正序电压幅值;  $U_1^*$  为正序电压的标么值。

如图 1 所示双端弱馈交流系统中, M 侧为新能源侧, N 侧为 MMC 侧;  $i_m$  和  $i_n$  分别为新能源侧、MMC 侧换流器输出的电流;  $f$  代表故障点。

以单相接地故障为例分析双端弱馈交流系统的故障特征。当双端弱馈交流系统发生 A 相接地故障后, 故障边界条件为

$$\begin{cases} \dot{U}_f^a = Z_f \dot{I}_f^a \\ \dot{I}_f^b = \dot{I}_f^c = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\dot{I}_f^b$ 、 $\dot{I}_f^c$  分别为故障点 B、C 相电流;  $\dot{U}_f^a$ 、 $\dot{I}_f^a$  分别为故障点 A 相电压和电流;  $Z_f$  为过渡阻抗。

将故障线路交流三相按照对称分量法展开成正、负、零序分量, 如式(3)所示。

$$\begin{cases} \dot{I}_f^{abc} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \dot{I}_f^{+0} \\ \dot{U}_f^{abc} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \dot{U}_f^{+0} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\dot{I}_f^{abc}$ 、 $\dot{U}_f^{abc}$  分别为故障点三相电流、电压;  $\dot{I}_f^{+0}$ 、 $\dot{U}_f^{+0}$  分别为故障点正、负、零序电流和正、负、零序电压; 其中  $a = 1 \angle 120^\circ$ 。

故障后, 双端弱馈交流系统等效序网如图 2 所示。与传统同步机系统不同, 故障后换流器受故障条件、控制策略等因素影响而表现出不同的故障特

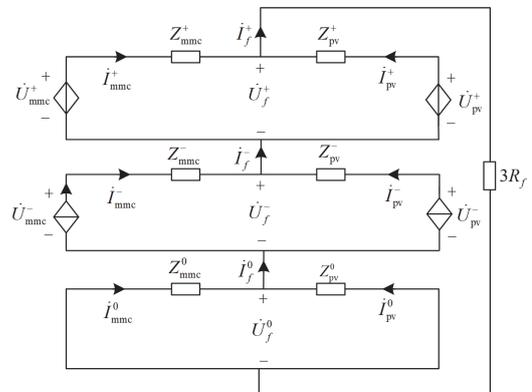


图 2 单相接地故障等效序网

Fig. 2 Equivalent sequence network for SPG fault

性。因此, 本文将双端弱馈交流系统复合序网中的正序电源和负序电源分别等效为受控源。

图2中:  $Z_{mmc}^+$ 、 $Z_{mmc}^-$ 、 $Z_{mmc}^0$  和  $Z_{pv}^+$ 、 $Z_{pv}^-$ 、 $Z_{pv}^0$  分别代表 MMC 侧和光伏侧正、负、零序阻抗;  $i_{mmc}^+$ 、 $i_{mmc}^-$ 、 $i_{mmc}^0$  和  $i_{pv}^+$ 、 $i_{pv}^-$ 、 $i_{pv}^0$  分别代表 MMC 侧和光伏侧正、负、零序电流;  $\dot{U}_f^+$ 、 $\dot{U}_f^-$ 、 $\dot{U}_f^0$  和  $\dot{I}_f^+$ 、 $\dot{I}_f^-$ 、 $\dot{I}_f^0$  分别代表故障点正、负、零序电压和电流;  $R_f$  为过渡电阻。

由式(2)和式(3)可得

$$\dot{I}_f^a = \dot{I}_f^+ + \dot{I}_f^- + \dot{I}_f^0 \quad (4)$$

结合单相接地序网图电流关系和式(4)可得

$$\dot{I}_f^0 = \dot{I}_f^+ = \dot{I}_f^- = \dot{I}_{pv}^0 + \dot{I}_{mmc}^0 = \dot{I}_{pv}^+ + \dot{I}_{mmc}^+ = \dot{I}_{pv}^- + \dot{I}_{mmc}^- = \frac{1}{3} \dot{I}_f^a \quad (5)$$

由式(5)可得故障电流为

$$\dot{I}_f^a = 3(\dot{I}_{pv}^+ + \dot{I}_{mmc}^+) = 3(\dot{I}_{pv}^- + \dot{I}_{mmc}^-) = 3(\dot{I}_{pv}^0 + \dot{I}_{mmc}^0) \quad (6)$$

根据故障边界条件式(2)和图2复合序网电流电压关系可得

$$\begin{aligned} \dot{I}_{mmc}^a &= \dot{I}_{mmc}^+ + \dot{I}_{mmc}^- + \dot{I}_{mmc}^0 = \\ &\dot{I}_{mmc}^+ + \frac{2Z_{pv}^0 + Z_{mmc}^0}{Z_{pv}^0 + Z_{mmc}^0} \dot{I}_{mmc}^- + \frac{Z_{pv}^0}{Z_{pv}^0 + Z_{mmc}^0} \dot{I}_{pv}^- \end{aligned} \quad (7)$$

$$\dot{I}_{pv}^a = \dot{I}_{pv}^+ + \dot{I}_{pv}^- + \dot{I}_{pv}^0 = -\dot{I}_{mmc}^+ + \frac{2Z_{mmc}^0 + Z_{pv}^0}{Z_{pv}^0 + Z_{mmc}^0} \dot{I}_{mmc}^- + \quad (8)$$

$$\frac{3Z_{mmc}^0 + 2Z_{pv}^0}{Z_{pv}^0 + Z_{mmc}^0} \dot{I}_{pv}^-$$

对于零序电流, 由于新能源网侧换流变压器和 MMC 侧换流变压器的接线形式均采用 Yn/d, d 接线形式能够阻止接地故障时零序电流流入变压器阀侧, 所以两侧换流器控制策略的改变不会对零序电流产生影响。

## 1.2 电流差动保护动作边界特性分析

文献[12-14]分析了传统抑制负序电流控制策略下大规模新能源送出系统中电流差动保护的适应性, 本文在此不再赘述。交流系统线路传统电流差动保护判据<sup>[13]</sup>为

$$\begin{cases} |\dot{I}_m + \dot{I}_n| > K |\dot{I}_m - \dot{I}_n| \\ I_{cd} = |\dot{I}_m + \dot{I}_n| \\ I_{zd} = |\dot{I}_m - \dot{I}_n| \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $I_{cd}$  为差动电流;  $I_{zd}$  为制动电流;  $K$  为制动系数, 一般在 0.5~0.8 范围内取值, 本文取 0.8。

为量化电流差动保护的動作性能, 以下通过理论推导定量给出电流差动保护的边界条件。由传统电流差动保护判据式(9)可得线路两侧电流幅值比  $\lambda$  和相角差  $\delta$  为

$$\begin{cases} \lambda = \frac{\max\{|\dot{I}_m|, |\dot{I}_n|\}}{\min\{|\dot{I}_m|, |\dot{I}_n|\}} \\ \delta = |\arg \dot{I}_m - \arg \dot{I}_n| \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\max\{\cdot\}$ 、 $\min\{\cdot\}$  分别表示取两个相量中幅值最大和最小的相量。

根据式(9)和式(10)可得幅值比和制动系数的关系为

$$\lambda > \frac{1+K}{1-K} \quad (11)$$

当  $K=0.8$  时, 由式(11)可知, 当  $\lambda > 9$  时, 无论  $\delta$  如何变化, 理论上电流差动保护均可识别区内故障。

基于式(10)和式(11), 可以构造如下函数<sup>[26]</sup>:

$$\begin{aligned} f(\lambda, \delta) &= \sqrt{1 + 4\lambda \cos \frac{\delta}{2} \sin \frac{\delta}{2} + \delta^2} - \\ &K \sqrt{1 + 4\lambda \cos \frac{\delta}{2} \sin \frac{\delta}{2} + \delta^2} \end{aligned} \quad (12)$$

如式(12)所示, 当  $f(\lambda, \delta) > 0$  时, 判定故障为区内故障; 当  $f(\lambda, \delta) = 0$  时, 判定电流差动保护处于临界动作状态; 当  $f(\lambda, \delta) < 0$  时, 判定故障为区外故障。由传统电流差动保护判据可知, 当两侧电流相角差小于  $90^\circ$  时, 区内故障时电流差动保护能够可靠动作; 当两侧电流幅值比满足式(11)时, 无论线路两侧电流相角差如何变化, 电流差动保护必然能够可靠动作。为进一步量化电流差动保护临界动作的相角和幅值条件, 令  $\lambda \in [1, 9]$ ,  $\delta \in [90^\circ, 180^\circ]$ , 可得  $f(\lambda, \delta)$  与  $\lambda$ 、 $\delta$  的关系如图3所示。

图3即为电流差动保护的動作特性, 当函数  $f(\lambda, \delta)$  图像位于 0 平面上方时, 电流差动保护判定故障为区内故障; 当函数  $f(\lambda, \delta)$  图像位于 0 平面下方时, 判定故障为区外故障; 函数图像和 0 平面相交曲线即为电流差动保护临界动作边界。由图3电流差动保护临界动作边界曲线可得,  $\lambda$  越大, 电流差动保护拒动的风险就越低。在极端情况下, 当两侧电流幅值相等时, 对应的临界动作条件相角差为  $102.5^\circ$ 。因此, 当  $\delta < 102.5^\circ$  时, 无论两侧电流幅值如何变化, 理论上电流差动保护均能够可靠动作。

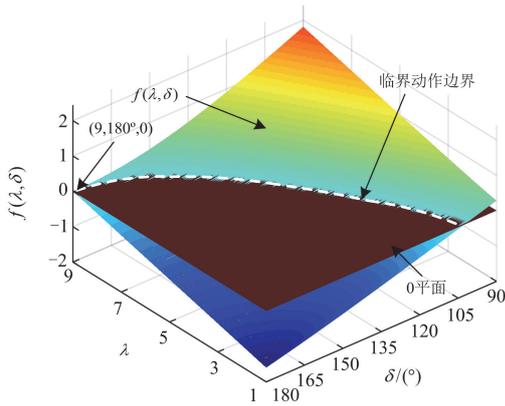


图3  $f(\lambda, \delta)$  与  $\lambda$ 、 $\delta$  的关系

Fig. 3 Relationship between  $f(\lambda, \delta)$  and  $\lambda$  and  $\delta$

当故障线路两侧电流满足幅值条件和相角条件其中任意一个条件时, 电流差动保护能可靠动作切除区内故障; 当且仅当两个条件均不满足时, 电流差动保护才判定故障为区外故障。

同时, 若双端弱馈交流系统故障后, 线路两侧换流器均采用抑制负序电流控制策略, 非故障相会出现过电压问题。在传统控制策略中, 由于 MMC 换流器将电网电压的  $d$ 、 $q$  轴正序分量作为控制变量, 在电网发生故障时, 如果电网电压的正序电压幅值仍然被控制为额定参考值, 此时将会出现线路非故障相过电压问题<sup>[27]</sup>。

## 2 计及负序协同控制策略改进的电流差动保护动作边界特性分析

由第 1 节中的分析可知, 当双端弱馈交流系统线路两侧换流器同时采用抑制负序电流控制策略时, 非故障相会出现过电压问题。结合文献<sup>[27]</sup>和文献<sup>[28]</sup>提出一种降压 V/F 控制和负序电压抑制协同控制策略。首先, 为降低非故障相过电压, 通过引入负序电压的幅值降低正序电压参考值以达到对 MMC 的正序电压参考值的控制。图 4 所示为动态降压 V/F 控制框图。因此, 正序电压参考值可表示为

$$u_d^{+*} = 1 - k \sqrt{u_{d\text{mmc}}^{-2} + u_{q\text{mmc}}^{-2}} \quad (13)$$

式中:  $k$  为降压系数, 一般取  $k=1$ ;  $u_d^{+*}$  为 MMC 侧正序电压  $d$  轴参考值;  $u_{d\text{mmc}}^-$ 、 $u_{q\text{mmc}}^-$  分别为 MMC 侧负序电压  $d$ 、 $q$  轴变量。

通过式(13)可知, MMC 侧将通过降低交流系统中正序电压的幅值, 以防止非对称交流故障期间交流电网中的过电压。同时, 正序电压的降低也防止了电压、电流控制器的饱和以及换流器的过调制, 保证了系统的可控性。

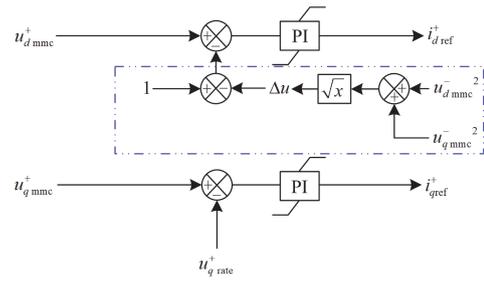


图4 动态降压 V/F 控制框图

Fig. 4 Block diagram of dynamic step-down V/F control

同时由文献<sup>[13]</sup>分析可知, 当双端弱馈交流系统线路两侧换流器同时采用抑制负序电流控制策略时, 故障点电流为 0, 导致传统电流差动保护不适用。所以, 故障期间为了使双端弱馈交流系统尽可能输出稳定对称的三相电压, 并且为电流差动保护提供动作条件, 可采用负序电压抑制控制策略。综上所述, MMC 侧可采用降压 V/F 控制和负序电压抑制协同控制策略, 如图 5 为负序电压抑制控制策略下的负序网络。此时, MMC 侧负序电压可以表示为式(14)。

$$\dot{U}_{\text{mmc}}^- = \dot{U}_{\text{pv}}^- + \dot{I}_{\text{mmc}}^- \cdot Z_{\text{mmc}}^- = 0 \quad (14)$$

式中:  $\dot{U}_{\text{mmc}}^-$  和  $\dot{U}_{\text{pv}}^-$  分别为柔直侧和新能源侧负序电压。

若新能源侧抑制负序电流能达到理想效果, 则

$$\dot{U}_{\text{pv}}^- = \dot{U}_f^- \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)得

$$\begin{cases} \dot{I}_{\text{pv}}^- = 0 \\ \dot{I}_{\text{mmc}}^- = \frac{\dot{U}_f^-}{Z_{\text{mmc}}^-} = \dot{I}_{\text{lim}}^- \end{cases} \quad (16)$$

$$\dot{I}_f^a = \dot{I}_{\text{pv}}^a + \dot{I}_{\text{mmc}}^a = \dot{I}_{\text{mmc}}^a \approx \dot{I}_{\text{lim}}^a \quad (17)$$

式中:  $\dot{I}_{\text{lim}}^-$  为换流器输出负序电流的限幅值。

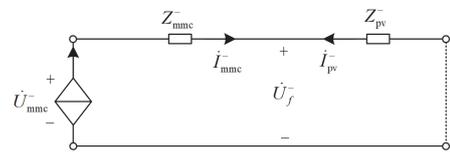


图5 负序电压抑制控制策略下的负序网络

Fig. 5 Negative sequence network under negative sequence voltage suppression control strategy

在负序电压抑制下, MMC 侧等同于短路, 此时 MMC 侧短路电流过大, 但考虑电力电子器件的安全运行范围, 因此 MMC 侧的短路电流应该限制在合理的水平, 所以通常情况下不足以将  $\dot{U}_{\text{mmc}}^-$  抑制

为0。如图6所示为降压V/F控制和负序电压抑制协同控制下MMC侧和新能源侧非故障相电压，可见在降压V/F控制和负序电压抑制协同控制策略下，非故障相过电压抑制效果明显。

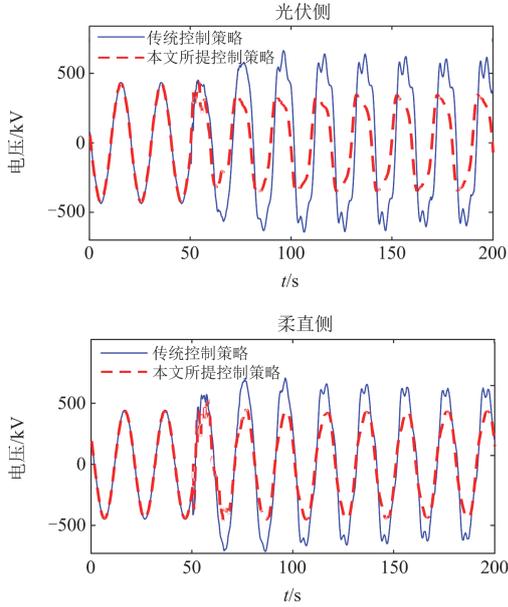


图6 在不同控制策略下非故障相电压幅值对比  
Fig. 6 Comparison of non-fault phase voltage amplitude in different control strategies

综上所述，为解决不对称故障期间的非故障相过电压问题，以及故障恢复阶段为抑制负序电压，使系统尽可能输出三相对称电压，快速恢复到稳态运行阶段，MMC侧换流器选择采用降压V/F控制和负序电压抑制协同控制策略。图7为双端弱馈交流系统整体控制框图。

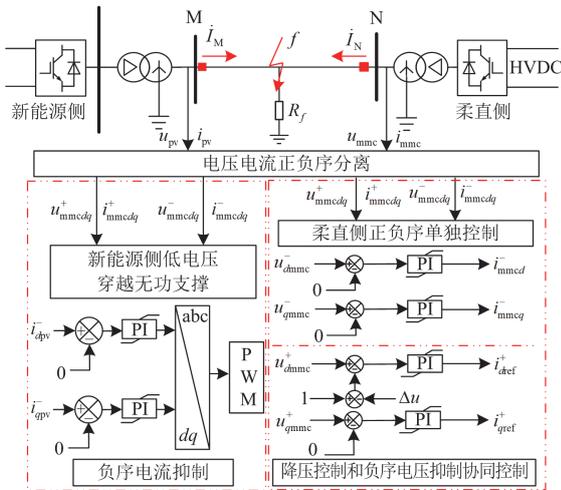


图7 系统整体控制策略  
Fig. 7 Overall control strategy of the system

根据上述分析可知，当MMC侧采用降压V/F控制和负序电压抑制协同控制策略时，MMC侧短路电流大于新能源侧短路电流，由式(7)和式(8)可知，当采用降压V/F控制和负序电压抑制协同控制策略时，制动电流和差动电流分别为

$$\begin{cases} I_{cd} = |I_f^a| = |I_{mmc}^a + i_{pv}^a| = |3I_{mmc}^-| \\ I_{zd} = |I_{mmc}^a - i_{pv}^a| = |2I_{mmc}^+ + \alpha I_{mmc}^-| \end{cases} \quad (18)$$

式中： $\alpha = \frac{Z_{pv}^0 - Z_{mmc}^0}{Z_{pv}^0 + Z_{mmc}^0}$ ； $i_{mmc}^a$ 和 $i_{pv}^a$ 分别为柔直侧和新能源侧a相电流。

受线路两侧变压器接线形式影响，两侧零序阻抗幅值相差不大，所以 $0 < \alpha < 1$ 。由式(17)可知，在降压V/F控制和负序电压抑制协同控制策略下，差动电流大于制动电流，传统电流差动保护判据依然适用。

为进一步验证降压V/F控制和负序电压抑制协同控制策略下电流差动保护的幅值边界，依据序电压序电流关系推导可得

$$\lambda = \frac{i_{mmc}^a}{i_{pv}^a} = \frac{i_{mmc}^+ + i_{mmc}^- + i_{mmc}^0}{i_{pv}^+ + i_{pv}^- + i_{pv}^0} \quad (19)$$

由式(6)和式(17)可得

$$i_f^- = i_{mmc}^- = i_{pv}^+ + i_{mmc}^+ = i_{pv}^0 + i_{mmc}^0 \quad (20)$$

将式(20)代入式(19)可得

$$\lambda = 1 + \frac{2Z_{pv}^0 i_{mmc}^+ + 2Z_{mmc}^0 i_{mmc}^+}{-Z_{pv}^0 i_{mmc}^+ - Z_{mmc}^0 i_{mmc}^+ + 2Z_{mmc}^0 i_{mmc}^- + Z_{pv}^0 i_{mmc}^-} \quad (21)$$

结合零序网络可知

$$i_f^0 = i_{pv}^0 + i_{mmc}^0 = \frac{U_f^0}{i_{pv}^0} + \frac{U_f^0}{i_{mmc}^0} \quad (22)$$

将式(22)代入式(21)消去 $U_f^0$ 可得

$$\lambda = 1 + \frac{2i_{mmc}^+ i_{mmc}^0 + 2i_{mmc}^+ i_{pv}^0}{-i_{mmc}^+ i_{mmc}^0 - i_{mmc}^+ i_{pv}^0 + 2i_{mmc}^- i_{pv}^0 + i_{mmc}^- i_{mmc}^0} \quad (23)$$

结合式(20)和式(23)可得

$$\lambda = 1 + \left| \frac{2i_{mmc}^+}{2i_{mmc}^- - i_{mmc}^+ - i_{mmc}^0} \right| \quad (24)$$

由MMC侧采用降压V/F控制和负序电压抑制协同控制策略，新能源侧采用抑制负序电流控制策略，在单相接地故障下可得

$$i_{mmc}^- > i_{mmc}^+, i_{mmc}^- > i_{pv}^0, i_{mmc}^- > i_{mmc}^0 \quad (25)$$

$$\lambda = 1 + \left| \frac{2i_{mmc}^+}{(i_{mmc}^- - i_{mmc}^+) + (i_{mmc}^- - i_{mmc}^0)} \right| > 1 \quad (26)$$

由式(26)可得降压V/F控制和负序电压抑制协

同控制策略下的幅值比  $\lambda > 1$ , 故满足电流差动保护动作的基本条件。

进一步可得 MMC 侧换流器采用降压 V/F 控制和负序电压抑制协同控制策略下电流差动保护的灵敏度  $K_{\text{sen}}$  为

$$K_{\text{sen}} = \frac{|i_{\text{max}} + i_{\text{min}}|}{K|i_{\text{max}} - i_{\text{min}}|} = \frac{|3i_{\text{mmc}}^-|}{K|2i_{\text{mmc}}^+ + \alpha i_{\text{mmc}}^-|} < \frac{1.5|i_{\text{mmc}}^-|}{K|i_{\text{mmc}}^+|} \quad (27)$$

由式(26)和式(27)可知, 控制策略改进后电流差动保护的灵敏度得到了提高, 但是受限于 MMC 侧正序电流和负序电流的比值大小。根据差动保护灵敏度系数的要求<sup>[29]</sup>, 电流差动保护的灵敏度应该大于等于 2。由式(27)可知, 控制策略改进后电流差动保护的灵敏度依旧不能满足实际工程的需要, 因此需要进一步提高电流差动保护的灵敏度。

虽然电流差动保护判据在第二种控制策略下依旧可以适用, 但影响电流差动保护性能最重要的问题是灵敏度不足。第 3 节中结合两侧电流幅值比提出一种自适应高灵敏度电流差动保护方案。

### 3 基于自适应校正函数的高灵敏度电流差动保护方案

鉴于传统电流差动保护在双端弱馈交流系统中的适应性较差, 为解决区内故障拒动以及区内故障灵敏度较低的问题, 本文在改进 MMC 侧负序分量控制策略的基础上, 提出一种基于幅值改进的高灵敏度电流差动保护方案。控制策略改进之后传统电流差动保护适用于双端弱馈交流系统, 但其灵敏度较低, 并且受影响的主要是区内故障时保护的動作性能, 区外故障时性能几乎不受影响。由以上对电流差动保护动作边界的分析可知, 当双端弱馈交流系统线路两侧电流幅值比足够大时, 无论相位差为多少, 电流差动保护均能够可靠识别区内外故障。双端弱馈交流系统线路两侧换流器输出电流的幅值特性受到控制策略的影响, 因此本文根据两侧电流的幅值对电流差动保护的判据进行改进。

如前文所述, 为了提高电流差动保护灵敏度并解决区内故障时保护拒动的问题, 本文对传统电流差动保护判据式(9)进行改进, 提出一种基于两侧电流幅值比的改进型电流差动保护, 保护判据如式(28)所示。

$$g_1(k_{\text{max}})|i_m + i_n| > K \cdot g_2(k_{\text{min}})|i_m - i_n| \quad (28)$$

式中:  $k_{\text{max}}$ 、 $k_{\text{min}}$  分别为 MMC 侧和新能源侧电流幅值差与最小、最大电流幅值比, 具体如式(30)所示;  $g_1(k_{\text{max}})$ 、 $g_2(k_{\text{min}})$  分别为差动电流和制动电流

的自适应校正函数。

传统电流差动保护区内故障时灵敏度不足甚至拒动的问题, 根源在于受传统负序控制策略影响使得差动电流较小, 而制动电流较大。因此, 本文所提改进型电流差动保护方案的基本思想是在改进控制策略的基础上利用自适应校正函数放大区内故障特征, 即增大差动电流减小制动电流, 从而提高电流差动保护的灵敏度。故在式(28)中分别引入自适应校正函数  $g_1(k_{\text{max}})$ 、 $g_2(k_{\text{min}})$ , 如式(29)所示。

$$\begin{cases} g_1(k_{\text{max}}) = 1 + \tanh(k_{\text{max}}) = \frac{2e^{k_{\text{max}}}}{e^{k_{\text{max}}} + e^{-k_{\text{max}}}} \\ g_2(k_{\text{min}}) = 1 - \tanh(k_{\text{min}}) = \frac{2e^{-k_{\text{min}}}}{e^{k_{\text{min}}} + e^{-k_{\text{min}}}} \end{cases} \quad (29)$$

其中

$$\begin{cases} k_{\text{max}} = \frac{i_{\text{max}}}{i_{\text{min}}} = \left| \frac{i_{\text{max}} - i_{\text{min}}}{i_{\text{min}}} \right| \\ k_{\text{min}} = \frac{i_{\text{min}}}{i_{\text{max}}} = \left| \frac{i_{\text{min}} - i_{\text{max}}}{i_{\text{max}}} \right| \end{cases} \quad (30)$$

区外故障时, 根据式(29)可知,  $g_1(k_{\text{max}}) = g_2(k_{\text{min}}) = 1$ , 所以式(28)所示判据与传统的电流差动保护判据一致。所以改进后的新判据式(28)并未降低区外故障时保护的可靠性, 与传统电流差动保护在区外故障时的性能等同。区内故障时, 因为  $i_{\text{max}}$  明显大于  $i_{\text{min}}$ , 所以  $g_1(k_{\text{max}}) > 1$  可以显著增大差动电流, 减少制动电流, 提升灵敏度。

判据改进后两侧电流的幅值比  $\lambda$  推导如下。

由改进后的判据可得

$$\frac{2(\lambda - 1)}{1 + e^{2-2\lambda}} > 2K(\lambda + 1) \frac{1}{e^{\frac{2}{\lambda}} + 1} \quad (31)$$

由式(31)可得

$$K < \frac{(\lambda - 1)(e^{\frac{2}{\lambda}} + 1)}{(\lambda + 1)(1 + e^{2-2\lambda})} \quad (32)$$

由式(32)可知, 当  $K = 0.8$  时,  $\lambda > 4.98$ , 此时无论线路两侧电流相角差如何变化, 电流差动保护理论上均可以可靠识别区内故障。

进一步可得改进后电流差动保护  $f(\lambda, \delta)$  与  $\lambda$ 、 $\delta$  的关系如图 8 所示。

判据改进后电流差动保护灵敏度推导如下。

$$\begin{aligned} \frac{g_1(k_{\text{max}})}{g_2(k_{\text{min}})} &= \frac{e^{k_{\text{max}}}(e^{k_{\text{min}}} + e^{-k_{\text{min}}})}{e^{k_{\text{min}}}(e^{k_{\text{max}}} + e^{-k_{\text{max}}})} = \frac{e^{k_{\text{max}}+k_{\text{min}}}(e^{k_{\text{min}}} + e^{-k_{\text{min}}})}{e^{k_{\text{max}}} + e^{-k_{\text{max}}}} > \\ &= \frac{e^{2k_{\text{max}}+k_{\text{min}}}(e^{2k_{\text{max}}} + 1)}{e^{k_{\text{max}}} + 1} = e^{2k_{\text{max}}+k_{\text{min}}} \end{aligned} \quad (33)$$

其中:

$$2k_{\max} + k_{\min} = 2 \left| \frac{i_{\max} - i_{\min}}{i_{\min}} \right| + \left| \frac{i_{\min} - i_{\max}}{i_{\max}} \right| > 0 \quad (34)$$

因此:

$$\frac{g_1(k_{\max})}{g_2(k_{\min})} > 1 \quad (35)$$

改进后电流差动保护的灵敏度为

$$K_{\text{sen}} = \frac{g_1(k_{\max}) |i_m + i_n|}{K \cdot g_2(k_{\min}) |i_m - i_n|} = \frac{g_1(k_{\max})}{g_2(k_{\min})} \cdot \frac{|3i_{\text{mmc}}^-|}{K |2i_{\text{mmc}}^+ + \alpha i_{\text{mmc}}^-|} > \frac{|3i_{\text{mmc}}^-|}{K |2i_{\text{mmc}}^+ + \alpha i_{\text{mmc}}^-|} \quad (36)$$

即电流差动保护在控制策略改进的基础上通过改进电流差动判据提高了电流差动保护的灵敏度。

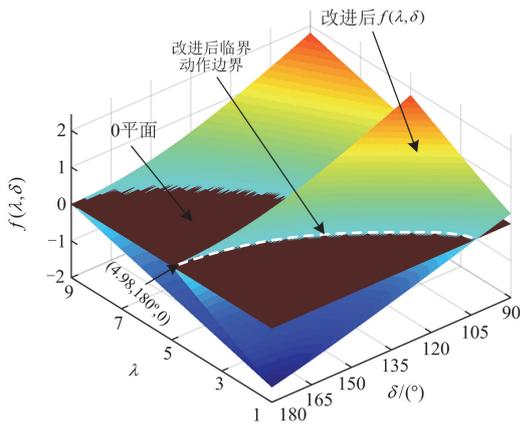


图 8 改进后电流差动保护  $f(\lambda, \delta)$  与  $\lambda$ 、 $\delta$  的关系

Fig. 8 Improved differential protection relationship between  $f(\lambda, \delta)$  and  $\lambda$  and  $\delta$

相较于提高电流差动保护区内故障时的灵敏度, 区外故障时, 对电流差动保护可靠性影响最大的是电流互感器(current transformer, CT)出现严重饱和, 这将可能导致保护误动。本文依托的实际工程中所采用的均是电力电子型或者光纤型电流互感器, 对于 CT 饱和问题在互感器选型时也考虑在内。但考虑到实际工程应用以及各个系统所采用的互感器设备之间存在差异, 为了增强本文所提电流差动保护区外故障时的可靠性, 本文通过构造辅助判据提高区外故障时电流差动保护的可靠性。

本文在改进电流差动保护判据的基础上, 考虑到电流互感器饱和情况下会影响区外故障时保护的可靠性, 因此增加辅助判据。区外故障时, 电流互

感器处于线性区时差动电流的绝对值很小, 一般小于 0.2 p.u., 考虑一定裕度, 取差动电流的绝对值应小于 0.3 p.u.。发生区内高阻故障时, 差动电流的绝对值远大于 0.3 p.u.。根据文献[30], 电流互感器严重饱和时至少有四分之一工频周期在线性区, 即 5 ms。综上所述, 构造辅助判据  $C_s$ , 利用故障后 3 ms 内的差动电流小于 0.3 p.u. 的采样点数和总采样点数作对比。由于区外故障电流互感器线性区多数差动电流的采样值小于 0.3 p.u., 所以  $C_s \geq 0.5$ , 而区内故障时, 由于多数差动电流的采样值大于 0.3 p.u., 所以  $C_s \leq 0.5$ 。因此构造的辅助判据如式(37)所示。

$$C_s \leq 0.5 \quad (37)$$

当主判据式(28)满足时, 再判断式(37)是否满足。如果辅助判据满足, 则判定为区外故障, 否则判定为区内故障。

综上所述, 基于控制策略改进的自适应高灵敏度电流差动保护方案整体动作流程图如图 9 所示。首先在 MMC 侧改进控制策略的基础上, 通过保护安装处实时采集线路两侧 CT 上检测到的电流信号, 通过离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)计算两侧电流的幅值, 故障发生后通过通信装置获取对端电流的幅值信息, 分别构造自适应校正函数  $g_1(k_{\max})$ 、 $g_2(k_{\min})$ , 并根据本文所提通过自适应校正函数构造的改进型保护判据对故障进行判别。

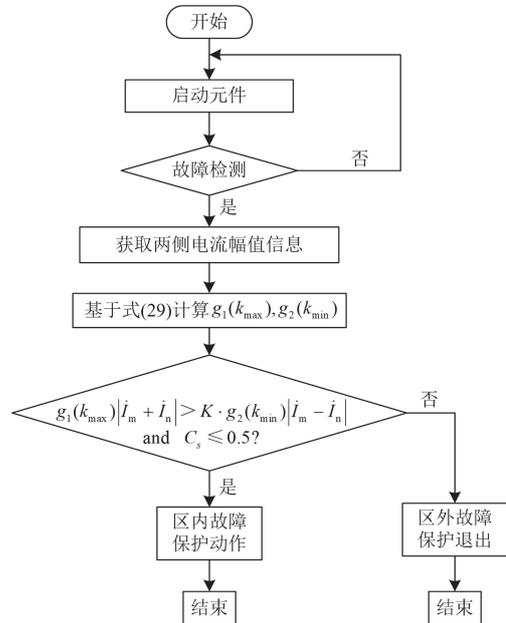


图 9 改进型电流差动保护方案

Fig. 9 Improved current differential protection scheme

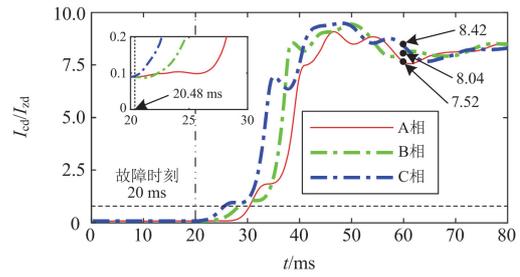
#### 4 仿真实验

为了验证本文所提改进型电流差动保护方案

的有效性, 在电磁仿真平台 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 1 所示的双端弱馈交流系统仿真模型。其中双端弱馈交流系统光伏场站额定容量为 1 MW, 通过 525 kV 送出线将电能传输到 MMC 侧, 经 MMC 侧送端换流器送出到电网系统。525 kV 线路全长 300 km, 线路模型为贝瑞隆模型, 单位长度线路参数:  $r_1 = 0.035 \Omega/\text{km}$ ,  $x_{11} = 0.507 \Omega/\text{km}$ ,  $r_0 = 0.363 \Omega/\text{km}$ ,  $x_{10} = 1.323 \Omega/\text{km}$ 。其中故障发生时刻为 20 ms, 故障持续时间为 60 ms。

#### 4.1 不同故障类型

为了验证不同故障类型下所提改进型电流差动保护方案的性能, 在区内线路中点设置故障类型为 A 相接地故障(AG)、AB 相间故障(AB)、AB 两相接地故障(ABG)、ABC 三相接地故障(ABCG), 包含对称故障和不对称故障, 以及在区外设置 A 相接地故障, 过渡电阻均为 50  $\Omega$ 。不同故障类型下的差动电流和制动电流之比以及区内故障时保护对故障的响应时间如图 10 所示。



(d) 区内ABC三相接地故障

图 10 不同故障类型

Fig. 10 Different fault types

如图 10 所示, 在区内发生不同类型故障时, 故障相的差动电流和制动电流的比值均大于保护动作阈值 0.8, 保护能够可靠识别区内故障。非故障相差动电流和制动电流的比值均远小于 0.8, 保护可靠识别故障。故本文所提改进型电流差动保护方案具有良好的动作特性, 并且保护对于区内故障的识别时间均小于 20 ms。本文所提电流差动保护判据可以在很短的时间内识别区内外故障, 能够满足高压输电线路主保护对速动性的要求。

区内故障和区外故障时 ABC 三相差动电流和制动电流的比值以及电流差动保护的灵敏度系数  $K_{sen}$  如表 1 所示。

表 1 区内外不同类型故障三相  $I_{cd}/I_{zd}$  和灵敏度系数

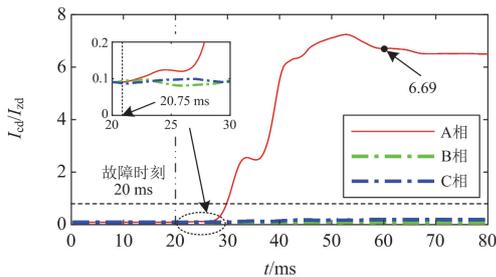
Table 1 Three-phase  $I_{cd}/I_{zd}$  and sensitivity coefficients for different types of internal and external faults

故障位置	故障类型	$I_{cd}/I_{zd}$			$K_{sen}$		
		A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
$f_1$ (区内)	AG	6.637	0.076	0.191	8.296	0.095	0.239
	AB	5.681	1.056	0.072	7.101	1.320	0.090
	ABG	6.298	5.253	0.206	7.873	6.566	0.258
	ABCG	8.187	8.045	7.859	10.234	10.056	9.824
$f_4$ (区外)	AG	0.043	0.079	0.254	0.054	0.099	0.318
	AB	0.033	0.041	0.056	0.041	0.051	0.070
	ABG	0.043	0.031	0.078	0.054	0.039	0.098
	ABCG	0.043	0.042	0.043	0.054	0.053	0.054

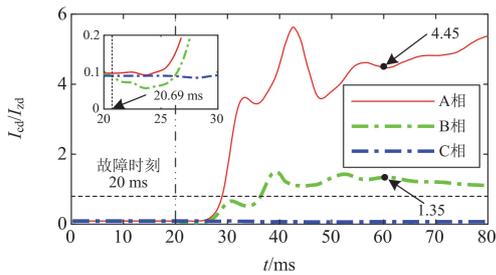
由表 1 可知, 发生区外故障时, 三相的灵敏度系数在整个故障过程中均可靠小于 0.8。发生区内故障时, 故障相的灵敏度系数均大于 1。综上所述, 所提改进型电流差动保护方案能够可靠、正确地识别区内外故障。

#### 4.2 不同过渡电阻

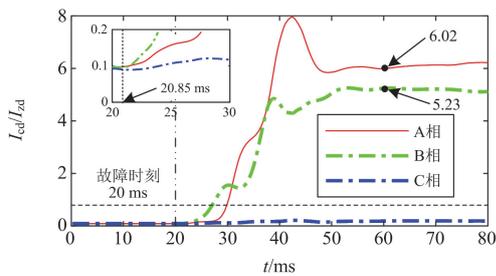
以双端弱馈交流系统线路中点  $f_2$  处 A 相接地故障为例, 验证经不同过渡电阻(10  $\Omega$ , 100  $\Omega$ , 200  $\Omega$ , 300  $\Omega$ )下本文所提改进型电流差动保护的性, 如图 11 所示。



(a) 区内A相接地故障



(b) 区内AB相间故障



(c) 区内AB两相接地故障

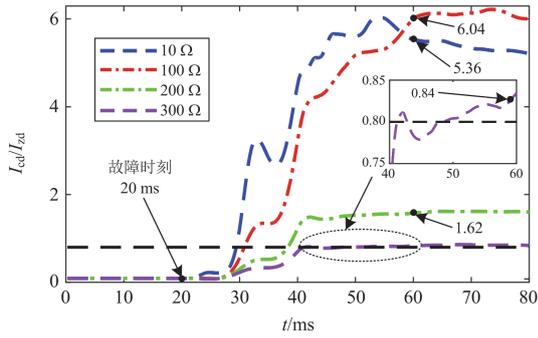


图 11 不同过渡电阻下改进型电流差动保护性能

Fig. 11 Improved current differential protection performance under different fault resistances

由图 11 可知，区内故障时，本文所提改进型电流差动保护随过渡电阻增加差动电流和制动电流的比值逐渐减小，在过渡电阻小于 300 Ω 时差动电流和制动电流的比值均大于 0.8。因此，本文所提改进型电流差动保护方案有着良好的耐过渡电阻能力。

如表 2 所示，随着过渡电阻增加，故障相灵敏度系数降低，非故障相灵敏度系数都可靠小于 1。随着过渡电阻增加，保护对于区内故障的识别时间变长。

表 2 不同过渡电阻下电流差动保护性能比较

Table 2 Comparison of current differential protection performance under different fault resistances

过渡电阻/Ω	$K_{sen}$			保护识别时间/ms		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
10	8.38	0.26	0.08	9.32	—	—
100	9.44	0.16	0.20	10.69	—	—
200	2.54	0.16	0.18	18.97	—	—
300	1.33	0.16	0.16	28.84	—	—

### 4.3 故障位置

本文所提保护方案是在换流器控制策略改进的基础上利用线路两侧电流幅值比构建了自适应保护动作判据。为了研究本文所提改进型电流差动保护方案在不同故障位置和过渡电阻下的性能，以单相接地故障为例，所得结果如图 12 所示。

由图 12 可得，故障相差动电流和制动电流的比值在不同过渡电阻和不同故障位置下均可靠大于 2。仿真结果表明本文所提差动保护方案具有良好的动作性能。

由表 3 可知，当故障发生在不同位置时，故障相差动电流和制动电流的比值均大于 0.8，非故障相差动电流和制动电流的比值均小于 0.8。因此，无论故障区段如何变化，改进型电流差动保护均能够可靠识别区内故障。仿真结果进一步证明了本文所提控制策略和改进判据的优越性。

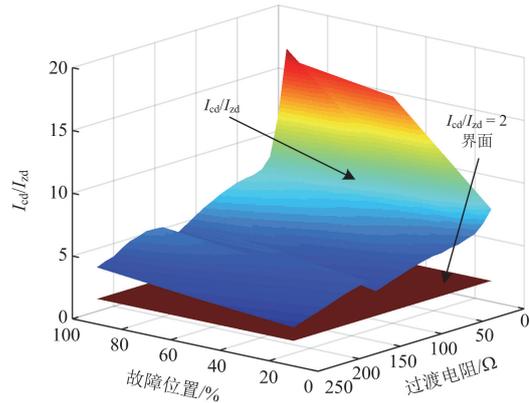


图 12 不同故障条件下的  $I_{cd}/I_{zd}$

Fig. 12  $I_{cd}/I_{zd}$  under different fault conditions

表 3 区内不同故障位置  $I_{cd}/I_{zd}$  和保护识别时间

Table 3  $I_{cd}/I_{zd}$  and protection identification time at different internal fault location

故障区段	故障类型	$I_{cd}/I_{zd}$			保护识别时间/ms		
		A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
$f_1$	AG	6.65	0.07	0.20	9.56	—	—
	AB	5.51	1.08	0.07	8.70	16.07	—
	ABG	6.22	5.29	0.21	9.21	6.82	—
	ABCG	7.84	7.79	7.53	10.12	8.10	5.30
$f_2$	AG	3.73	0.20	0.08	10.07	—	—
	AB	6.76	1.11	0.07	8.17	15.66	—
	ABG	6.81	3.14	0.11	9.77	7.51	—
	ABCG	9.70	9.70	9.84	9.55	8.34	4.73
$f_3$	AG	2.22	0.26	0.09	10.01	—	—
	AB	8.22	1.40	0.06	7.29	14.52	—
	ABG	7.78	1.67	0.09	8.91	7.68	—
	ABCG	4.53	4.56	4.72	8.87	8.54	4.43

### 4.4 与传统电流差动保护性能比较

为了进一步验证本文所提电流差动保护方案性能的优越性，通过保护对区内不同故障类型的识别时间和耐受过渡电阻能力将本文所提电流差动保护方案与传统电流差动保护方案进行对比。

#### 1) 保护对不同故障类型识别时间对比

由表 4 可知，本文所提控制策略相比于传统抑制负序电流控制策略有着明显的优势，本文所提控制策略下，故障相电流差动保护均可以可靠识别区内故障。并且本文所提高灵敏度电流差动保护方案相比于传统电流差动保护方案对区内故障的识别速度更快，能够满足高压输电线路主保护对速动性的要求。

#### 2) 耐受过渡电阻能力比较

过渡电阻分别为 50 Ω 和 300 Ω 时，不同方案

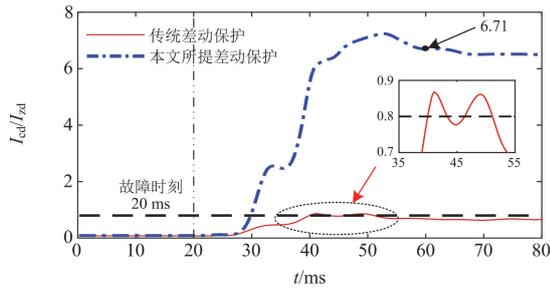
的性能比较如图 13 所示。由图 13(a)可知, 过渡电阻为  $50 \Omega$  时, 传统控制策略下传统电流差动保护处于临界动作边界; 本文所提电流差动保护方案差动电流和制动电流的比值为 6.71, 保护能够可靠识别区内故障; 由图 13(b)可知, 过渡电阻为  $300 \Omega$  时, 传统控制策略下传统电流差动保护拒动; 本文所提电流差动保护方案能够可靠识别区内故障。因此, 本文所提电流差动保护具有更强的耐过渡电阻能力。

表 4 所提保护方案在不同故障类型下的故障识别时间

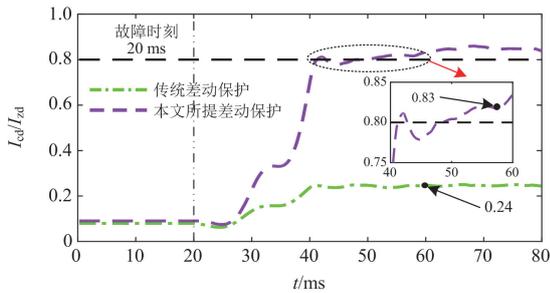
Table 4 Fault time identification of the proposed protection scheme under different fault types

故障类型	传统电流差动保护			改进型电流差动保护		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
AG	19.83	—	—	10.07	—	—
AB	15.55	18.72	—	8.17	15.66	—
ABG	18.94	18.21	—	9.77	7.50	—
ABCG	18.08	16.56	13.11	9.55	8.34	4.73

ms



(a) 过渡电阻  $50 \Omega$



(b) 过渡电阻  $300 \Omega$

图 13 电流差动保护耐过渡电阻能力对比

Fig. 13 Comparison of resistance to fault resistance of current differential protection

#### 4.5 不同噪声对保护的影响

为测试所提保护方案的耐噪声能力, 在故障电流数据中分别加入  $40 \text{ dB}$ 、 $35 \text{ dB}$ 、 $30 \text{ dB}$  和  $25 \text{ dB}$  的噪声。以  $f_2$  处单相接地故障为例, 过渡电阻为  $50 \Omega$ , 所提保护方案对故障的识别情况如表 5 所示。

从表 5 中可以看出, 在不同噪声干扰下, 对本

文所提保护的動作性能影响较小。无论故障相或非故障相, 差动电流和制动电流的比值变化均较小, 保护能够可靠识别区内故障。因此本文所提保护方案具有良好的抗噪能力。

表 5 不同噪声对保护性能的影响

Table 5 Impact of different noise on protection performance

故障类型	噪声/dB	$I_{cd}/I_{zd}$		
		A 相	B 相	C 相
AG	40	3.71	0.07	0.15
	35	3.85	0.08	0.21
	30	3.58	0.08	0.21
	25	3.71	0.08	0.21
AB	40	6.82	1.13	0.07
	35	3.90	1.11	0.07
	30	7.09	1.08	0.07
	25	7.08	1.04	0.07
ABG	40	6.79	3.11	0.10
	35	6.92	3.16	0.11
	30	6.91	3.05	0.07
	25	6.43	3.13	0.12
ABCG	40	9.82	9.65	9.85
	35	9.75	9.58	9.99
	30	9.73	9.81	10.23
	25	9.68	8.98	9.06

## 5 结论

本文在改进控制策略的基础上提出一种基于幅值改进的自适应电流差动保护方案, 可得以下结论。

1) 本文所提改进型控制策略适用于双端弱馈交流系统, 能够降低非对称故障后非故障相过电压。本文所提电流差动保护边界可以为其他电流差动保护方案的性能提供量化参考。

2) 本文所提电流差动保护方案具有高可靠性,  $25 \text{ dB}$  噪声下可以可靠识别区内外故障; 本文所提电流差动保护方案在过渡电阻不超过  $300 \Omega$  的范围内均可以可靠识别区内故障, 适用于双端弱馈交流系统。

3) 本文所提改进型电流差动保护方案是在传统电流差动保护判据的基础上进行改进, 需要两端电流幅值信息, 故对数据传输有一定的要求。因此, 后续将重点研究对数据传输要求较低的纵联保护方案。

## 参考文献

[1] 李璐, 张泽端, 毕贵红, 等. “双碳”目标下基于系统动力学的发电行业碳减排政策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 69-81.  
LI Lu, ZHANG Zeduan, BI Guihong, et al. Carbon emission reduction policy in the power generation sector

- based on system dynamics with “dual carbon” targets[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(12): 69-81.
- [2] 汪楠楠, 卢宇, 唐浩, 等. 应用于新能源孤岛经柔直送出系统的交流耗能优化投切策略[J]. *电力建设*, 2024, 45(12): 187-194.  
WANG Nannan, LU Yu, TANG Hao, et al. Improved switching strategies of AC energy consumption devices for VSC-HVDC system with renewable energy integration in island mode[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(12): 187-194.
- [3] 王振浩, 王欣铎, 李金伦, 等. 风电经柔性直流组网系统受端交流故障过电压分析及穿越策略[J]. *南方电网技术*, 2023, 17(8): 11-22.  
WANG Zhenhao, WANG Xinduo, LI Jinlun, et al. Overvoltage analysis and ride-through strategy of AC fault at receiving-end of the flexible HVDC system integrated with wind farms[J]. *Southern Power System Technology*, 2023, 17(8): 11-22.
- [4] 苏步芸, 王诗超. 新型电力系统背景下新能源送出合理消纳率研究[J]. *南方能源建设*, 2023, 10(6): 43-50.  
SU Buyun, WANG Shichao. Research on reasonable consumption rate of new energy transmission under the new power system[J]. *Southern Energy Construction*, 2023, 10(6): 43-50.
- [5] 戴志辉, 吴桐, 何静远, 等. 基于控保协同的有源配网主动注入式保护方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(3): 94-103.  
DAI Zhihui, WU Tong, HE Jingyuan, et al. An active distribution network active injection protection method based on control-protection coordination[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(3): 94-103.
- [6] 郭雅蓉, 周泽昕, 刘宇, 等. 基于电流和电压联合制动的线路差动保护新原理[J/OL]. *中国电机工程学报*: 1-14[2024-11-12]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.232465.  
GUO Yarong, ZHOU Zexin, LIU Yu, et al. New principle offline differential protection based on combined current and voltage restraint principle[J]. *Proceedings of the CSEE*: 1-14[2024-11-12]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.232465.
- [7] 罗国敏, 赵祎薇, 吴梦宇, 等. 适应高比例新能源接入的配电网改进型自适应电流保护方法[J]. *供用电*, 2024, 41(9): 12-23.  
LUO Guomin, ZHAO Yiwei, WU Mengyu, et al. Improved adaptive current protection method suitable for distribution network adapted to high proportion of new energy source accessed[J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(9): 12-23.
- [8] 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.
- [9] 常鹏, 宋国兵, 侯俊杰, 等. 传统交流线路保护在换流器并网系统中的适应性分析[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(3): 57-66.  
CHANG Peng, SONG Guobing, HOU Junjie, et al. Adaptability analysis of traditional AC line protection in inverter-interfaced system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(3): 57-66.
- [10] 刘乃皓, 高厚磊, 徐彬, 等. 基于电流变化量相似性的海上风电场交流送出线路纵联保护[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(9): 65-75.  
LIU Naihao, GAO Houlei, XU Bin, et al. Pilot protection for an AC transmission line of an offshore wind farm based on similarity of current variation[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(9): 65-75.
- [11] ZHAO Q, CHENG H, ZHENG X, et al. High sensitivity differential protection for AC line in MMC-HVDC system[C] // 2023 IEEE International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), October 8-12, 2023, Xuchang, China: 528-533.
- [12] 蒋嘉桁, 张晨浩, 宋国兵, 等. 电流差动保护在海上风电低频送出线路中的适应性分析[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(1): 131-139.  
JIANG Jiaheng, ZHANG Chenhao, SONG Guobing, et al. Adaptability analysis of current differential protection in low-frequency transmission lines of offshore wind power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(1): 131-139.
- [13] 郑涛, 庄心怡, 吕文轩. 海上风电柔直换流站负序电流参考值选取及保护适应性分析[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(3): 133-141.  
ZHENG Tao, ZHUANG Xinyi, LÜ Wenxuan. Negative sequence current reference selection and protection adaptability analysis of flexible DC converter station for offshore wind power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(3): 133-141.
- [14] 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.
- [15] 李娟, 高厚磊, 朱国防. 考虑逆变类分布式电源特性的有源配电网反时限电流差动保护[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(17): 74-83.

- LI Juan, GAO Houlei, ZHU Guofang. Inverse-time current differential protection in active distribution network considering characteristics of inverter interfaced distributed generations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 74-83.
- [16] 周成瀚, 邹贵彬, 杜肖功, 等. 基于正序电流故障分量的有源配电网纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2102-2112.
- ZHOU Chenghan, ZOU Guibin, DU Xiaogong, et al. A pilot protection method based on positive sequence fault component current for active distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2102-2112.
- [17] 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.
- [18] 肖澍昱, 林湘宁, 魏繁荣, 等. 面向含不可测分支配电网线路不对称故障可靠辨识的负序电流比相保护判据[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 1-13.
- XIAO Shuyu, LIN Xiangning, WEI Fanrong, et al. Phase comparison protection of negative sequence current for distribution lines with unmeasurable branches[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 1-13.
- [19] LIU S, WANG B, ZHAO Y, et al. Novel differential protection approach of UHV AC transmission lines based on Tellegen's quasi-power theorem[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(2): 1264-1274.
- [20] 郑黎明, 贾科, 毕天姝, 等. 基于结构相似性与平方误差的新能源场站送出线路纵联保护综合判据[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1788-1797.
- ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Comprehensive criteria of pilot protection based on structural similarity and square error for outgoing line from renewable power plants[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1788-1797.
- [21] LIANG Y, REN Y, ZHANG Z. Pilot protection based on two-dimensional space projection of dual differential currents for lines connecting MMC-HVDC stations[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(5): 4356-4368.
- [22] HOSSIN M, LEEVONGWAT I, RASTGOUGARD P. Revisions on Alpha plane for enhanced sensitivity of line differential protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 3260-3262.
- [23] 李铁成, 范辉, 张卫明, 等. 基于 5G 通信的有源配电网新能源送出线路纵联保护[J]. 中国电力, 2023, 57(11): 1-11.
- LI Tiecheng, FAN Hui, ZHANG Weiming, et al. Pilot protection of new energy transmission line in active distribution network based on 5G communication[J]. Electric Power, 2023, 57(11): 1-11.
- [24] 张建雨, 姜睿智, 李俊刚, 等. 基于 5G 通信的配电网差动保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 17-23.
- ZHANG Jianyu, JIANG Ruizhi, LI Jungang, et al. Research on differential protection of a distribution network based on 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 17-23.
- [25] 光伏发电并网逆变器技术要求: GB/T 37408—2019[S]. 2019.
- [26] 梁营玉, 王亚琴, 任昞, 等. MMC-HVDC 换流站交流侧联络线高灵敏度电流差动保护[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 163-172.
- LIANG Yingyu, WANG Yaqin, REN Yi, et al. High-sensitivity current differential protection for AC-side tie line of MMC-HVDC converter station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 163-172.
- [27] SHI L, ADAM G, LI R, et al. Control of offshore MMC during asymmetric offshore AC faults for wind power transmission[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1074-1083.
- [28] DENG J, YAO L, CHENG F, et al. An enhanced voltage correction control strategy for asymmetrical fault ride-through of offshore wind power using MMC-HVDC[C]// 2023 6th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), May 12-14, 2023, Guangzhou, China: 728-734.
- [29] 陆于平, 李玉海, 李鹏, 等. 差动保护灵敏度与启动电流、制动系数和原理之间的关系[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(8): 51-55.
- LU Yuping, LI Yuhai, LI Peng, et al. Discussion on relationship of pick-up current, restrained factor and principles to the differential protection sensitivity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(8): 51-55.
- [30] WENG H, WANG S, LIN X, et al. A novel criterion applicable to transformer differential protection based on waveform sinusoidal similarity identification[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 105: 305-314.

收稿日期: 2024-05-28; 修回日期: 2024-12-13

作者简介:

高强强(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 1782491522@qq.com

侯俊杰(1993—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 826686025@qq.com

樊艳芳(1971—), 女, 硕士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: fyf3985@xju.edu.cn

(编辑 魏小丽)