

适应高比例光伏接入的有源配电网自适应 电流差动保护

陈水耀¹, 徐 峰², 潘武略¹, 李跃辉², 武继增³, 刘素梅³

(1. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310007;

2. 国网浙江省电力有限公司金华供电公司, 浙江 金华 321000;

3. 北京林业大学, 北京 100083)

摘 要: 光伏电源大量接入配电网使得配电网线路差动保护的差动电流与制动电流发生变化, 传统比率制动式差动保护存在不正确动作风险。为此, 在系统分析光伏所接线路两侧基频电流幅值与相角变化特性的基础上, 说明光伏电源接入后传统电流差动保护存在的问题; 通过推导差动保护临界动作曲线上比率制动系数与两侧电流相角之间的数学关系, 提出了一种自适应调整比率制动系数的电流差动保护改进判据; 基于PSCAD/EMTDC搭建了含光伏电站的配电网仿真模型, 对所提保护改进策略进行了测试, 验证了光伏电站高比例接入后所提保护改进策略的有效性和可靠性。

关键词: 自适应电流差动保护; 比率制动系数; 保护适应性; 高比例光伏电站接入; 线路保护

DOI: 10.19585/j.zjdl.202501004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Adaptive current differential protection for active distribution networks accommodating high levels of PV integration

CHEN Shuiyao¹, XU Feng², PAN Wulue¹, LI Yuehui², WU Jizeng³, LIU Sumei³

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China;

2. State Grid Jinhua Power Supply Company, Jinhua, Zhejiang 321000, China;

3. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The large-scale integration of photovoltaic (PV) sources into distribution networks alters the differential current and braking current of line differential protection, leading to a risk of maloperation in traditional ratio restraint differential protection. This study analyzes the changes in the fundamental-frequency current amplitude and phase angle on both sides of the line connected to the PV source, highlighting the subsequent issues with traditional current differential protection. By deriving the mathematical relationship between the ratio restraint coefficient and the phase angles of the currents on either side, as reflected in the critical operation curve of differential protection, the paper proposes an improved adaptive current differential protection criterion for adjusting the ratio restraint coefficient. A simulation model of distribution networks with PV stations is developed using PSCAD/EMTDC to test the proposed protection strategy, demonstrating its effectiveness and reliability under high levels of PV integration.

Keywords: adaptive current differential protection; ratio restraint coefficient; protection adaptability; high levels of PV station integration; line protection

0 引言

随着“双碳”国家战略目标的实施, 光伏在配电网中的接入比例逐渐提高^[1-2]。截至2023年6月, 我国分布式光伏发电装机容量达到1.98亿kW, 约

占总装机的7.3%。尤其是在我国局部受端电网中, 分布式光伏等新能源电源接入电网的比例正迅猛增加^[3-4]。例如, 截至2024年2月浙江省新能源场站的累计装机容量为4 148万kW, 其中光伏电站达3 562万kW, 分布式光伏占80%左右。据相关统计数据, 局部时间段内浙江电网中光伏出力达2 058万kW, 占总用电负荷的25.5%。

为保证分布式光伏等新能源场站大规模接入后配电网安全稳定运行, 根据GB/T 33982—2017

基金项目: 国家自然科学基金(52107069); 国网浙江省电力有限公司科技项目(B311JH23000D)

《分布式电源并网继电保护技术规范》,若电网要求配置全线速动保护,光伏电源所接线路通常需配置电流差动保护作为主保护^[5]。在传统电流差动保护故障分析计算中,通常将线路两侧所接电源均等值为电压源串联阻抗的模型,即认为电网故障下所有电源所提供的短路电流相角均在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化^[6]。实际上,因受并网导则要求的无功功率支撑等影响,光伏电站提供的短路电流相角在 $-90^\circ \sim 0^\circ$ 范围内变化^[7-8],这导致线路上发生区内故障时光伏电站侧与系统侧短路电流的相角差大于 90° ,电流差动保护存在拒动风险^[9]。因此,亟需分析论证光伏电站接入背景下配电线路电流差动保护的适应性,并进一步提出相应的保护改进判据。

针对电流差动保护适应性问题,文献[10]仿真分析了不同故障类型、不同过渡电阻条件下,光伏电站T接于配电线路后电流差动保护的動作特性,揭示了传统电流差动保护无法同时满足区内故障下保护灵敏性和区外故障下保护可靠性的要求。文献[11]搭建了光伏电站T接于配电网的仿真模型,通过仿真分析得出光伏电站接入容量增加会导致区内故障下线路两侧差动电流减小,可能导致保护拒动。文献[12]同样通过仿真分析得出,无功补偿暂态控制策略影响光伏电站所提供短路电流相角与同步发电机有所不同,使得差动电流减小,制动电流增大,进而导致比率制动式保护灵敏度降低。以上研究均从仿真角度入手,分析结果对仿真模型依赖较大,普适性有所欠缺。为此,也有研究从理论角度分析光伏接入对传统电流差动保护的影响,结合光伏电站并网容量增加使配电线路光伏侧与系统侧电流幅值比增大的特性,揭示了线路两侧电流幅值比增加会使区内故障保护出现拒动情况^[13-15],但该研究并未涉及短路电流相角变化的影响。

针对新能源接入电网对传统差动保护带来的问题,国内外学者分别提出了一些保护新原理与改进判据。在保护新原理方面,学者分别结合新能源场站与传统同步发电机短路电流波形差异特征^[16-17]、电流突变量夹角余弦值^[18]、高频等值阻抗^[19]等识别区内外故障。然而,这些差动保护新原理的動作门槛确定需理论论证。也有研究通过

增加辅助判据的方式对传统电流差动保护動作判据进行改进,文献[20]利用光伏等逆变电源所接线路两侧短路电流幅值变化特征,提出基于故障电流幅值比的电流差动保护改进判据,但该判据仅考虑了线路两端短路电流幅值变化特征,并未深入分析短路电流相角变化特性对保护的影响。随着光伏电站接入容量增加,短路电流相角变化特性对现有保护的影响不容忽视。针对此问题,部分学者通过传统电流差动保护判据中引入幅值与相角补偿量,以实现自适应调整比率制动系数,从而确保区内故障下保护能够正确動作^[21-23],但仅从定性角度简述了引入补偿量的必要性,在极端故障场景下补偿量是否仍有效还需进一步论证。

为此,本文结合光伏电站接入容量与其短路电流幅值和相角的数学关系,分别从理论定性和仿真定量的角度剖析光伏电站接入对传统电流差动保护動作特性的影响,并进一步推导了差动保护临界動作曲线上比率制动系数与线路两侧电流相角之间的数学关系,从而提出了一种适应高比例光伏电站接入的配电网线路自适应电流差动保护判据。最后,基于PSCAD/EMTDC搭建了含光伏电站的有源配电网电磁暂态仿真模型,并对所提出的保护改进策略进行了测试,在光伏电站与所接等值电网不同容量比、不同故障类型以及不同过渡电阻场景下,证明了与传统电流差动保护動作特性相比,所提电流差动保护改进判据具有更高的可靠性与灵敏性。

1 传统电流差动保护存在问题分析

1.1 光伏电源短路电流变化特性

光伏发电系统的并网拓扑结构及其相关控制如图1所示,发电单元通过DC/AC逆变器与电网相连。电网故障下DC/AC逆变器通常采用抑制负序电流的控制策略,即光伏电源只提供正序电流,又根据我国发布的《光伏电站接入电力系统技术规定》要求^[24],故障期间逆变控制中无功电流参考值应设置为:

$$i_{q-pv}^{p*} = K_1(0.9 - \gamma_{pv})I_{N-pv} \quad (1)$$

式中: K_1 为动态无功电流比例系数,其取值范围为1.5~3,本文取为1.5; $\gamma_{pv} = u_{g-pv}^p / U_{gN}$ 为光伏

并网点正序电压跌落系数, 其中 u_{g-pv}^p 为光伏并网点正序电压, U_{gN} 为光伏并网点额定电压; I_{N-pv} 为光伏逆变器的额定电流。

图1中逆变器控制外环为直流母线电压环, 而直流母线电压与光伏发电单元输出的功率存在如下关系:

$$U_{dc-pv} C_{pv} \frac{dU_{dc-pv}}{dt} = P_{pv} - P_{g-pv} \quad (2)$$

式中: U_{dc-pv} 为直流母线电压; C_{pv} 为直流电容; P_{pv} 为光伏发电单元输出的功率; P_{g-pv} 为由DC/AC变流器输出到电网的有功功率。

通过控制直流母线电压可实现对光伏发电单元输出功率的有效调节, 而光伏发电单元输出的功率 P_{pv} 主要由DC/DC变流器的MPPT(最大功率跟踪)控制影响, 光照度越强, 输出功率 P_{pv} 越大。因逆变器的故障隔离作用, 电网故障并不会对DC/DC变流器的MPPT控制产生影响, 但因逆变器过流能力有限, 一旦其上流过的电流超过变流器最大允许电流, 此时电流限幅环节将会作用。这会导致逆变器输出的有功功率 P_{g-pv} 小于发电单元提供的功率 P_{pv} , 直流母线电压将会升高, 一旦直流电压超过 1.05 p.u. 时, 直流卸荷电路发生作

用, 直流侧的多余能量消耗在卸荷电路电阻上。从电网侧看, 直流卸荷电路投入并不会直接对光伏电源提供的短路电流产生影响。光伏发电系统所提供短路电流的幅值主要受到电流限幅环节的影响, 最大不超过额定电流的 1.2~1.5 倍, 短路电流的相角主要受变流器提供的无功电流大小以及电流限幅环节作用与否等因素有关。

根据前文分析, 可推导出光伏电源所提供稳态短路电流幅值表达式为:

$$I_f^m = \begin{cases} \frac{2 \sqrt{P_{pv}^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} S_{N-pv} \gamma_{pv} K_1 (0.9 - \gamma_{pv})\right)^2}}{3 \gamma_{pv} U_{gN-pv}}, & \alpha = 0 \\ I_{lim} = (1.2 \sim 1.5) \frac{2 S_{N-pv}}{3 U_{gN-pv}}, & \alpha = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\alpha=0$ 为电流限幅环节尚未发生作用, 而 $\alpha=1$ 为电流限幅环节发生作用; S_{N-pv} 为光伏电源的额定容量; U_{gN-pv} 为光伏电源并网点额定电压。

同时, 光伏电站所提供短路电流的相角计算表达式为:

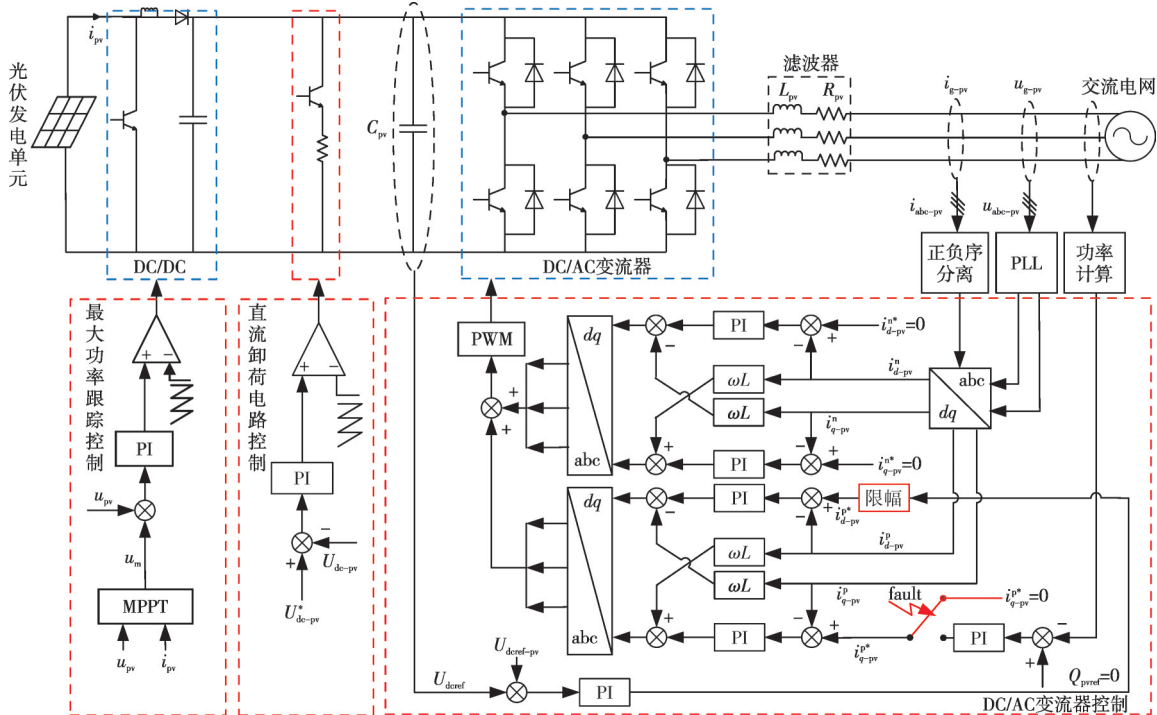


图1 光伏发电系统拓扑结构及控制框图

Fig.1 Topology and control block diagram of the photovoltaic power generation system

$$\theta_{i-pv} = \begin{cases} -\arctan \left(\frac{\frac{\sqrt{3}}{2} S_{N-pv} \gamma_{pv} K_1 (0.9 - \gamma_{pv})}{P_{pv}} \right), & \alpha = 0 \\ -\arctan \left(\frac{1}{\sqrt{\left(I_{lim} / (K_1 (0.9 - \gamma_{pv}) I_{N-pv}) \right)^2 - 1}} \right), & \alpha = 1 \end{cases} \quad (4)$$

因逆变器最大允许电流 I_{lim} 通常仅为额定电流的 1.2~1.5 倍, 所以故障下光伏电源所提供的短路电流极易受限。在短路电流受限情况下, 光伏电源容量 S_{N-pv} 越大, 其所提供短路电流幅值也将越大, 而短路电流相角主要与并网点电压跌落程度有关, 在不同电压跌落程度下短路电流相角不同, 其变化范围为 $-90^\circ \sim 0^\circ$ 。

1.2 传统保护存在问题分析

若忽略负荷影响, 光伏电源所接配电网的典型拓扑结构如图 2 所示, 这里规定专线线路上流过电流的正方向是从母线流向线路, $\dot{I}_m$ 和 $\dot{I}_n$ 分别为光伏侧、系统侧流过保护装置的电流相量。

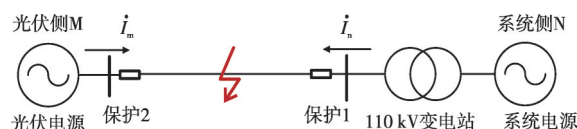


图 2 含光伏电源的配电线路拓扑结构

Fig.2 The topological structure of the distribution line with the photovoltaic power station

图 2 所示光伏电源为 110 kV 变电站所接低压电网中所有光伏电源的等值, 光伏电源未接入情况下, 110 kV 变电站所接低压配电线路发生故障后, 仅由系统向故障点提供短路电流, 通常会在配电线路系统侧配置电流保护; 而若有光伏电源接入, 光伏电源和系统会同时向故障点提供短路电流, 若电网要求配置全线速动保护, 此场景下光伏电源所接线路通常需配置比率制动式电流差动保护作为主保护。

根据前文分析, 线路上光伏电源侧所提供短路电流的幅值不超过其额定电流的 1.2~1.5 倍, 相角主要受并网点电压 U_{gN-pv} 的跌落程度等影响, 其变化范围为 $-90^\circ \sim 0^\circ$ 。然而, 系统侧短路电流幅

值通常远大于其额定电流, 其相角变化范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。若光伏电源提供的短路电流幅值远小于系统侧短路电流, 线路上所配置电流差动保护中差动电流与制动电流的大小关系主要受系统侧短路电流变化影响, 与光伏侧短路电流变化特性无关。若光伏电源所提供的短路电流幅值与系统侧短路电流相当时(比如光伏接入容量较大且发生高阻接地故障), 差动电流与制动电流的大小关系将同时受光伏侧与系统侧短路电流相角影响, 比率制动系数为 0.6 时, 一旦两侧电流相角差超过 110° , 区内故障下差动电流总大于比率制动系数倍制动电流的关系将不再成立, 电流差动保护存在较大的拒动风险^[25]。

2 电流差动保护改进判据

针对光伏电站高比例接入后, 当区内故障时传统电流差动保护拒动的问题, 提出了一种自适应调整比率制动系数的电流差动保护改进判据。首先, 将线路两侧电流 $\dot{I}_m$ 与 $\dot{I}_n$ 的比值关系用 $\dot{F}$ 来表示, 根据 $\dot{I}_m$ 与 $\dot{I}_n$ 的幅值大小关系不同, 可表示为:

$$\dot{F} = \frac{\min(\dot{I}_m, \dot{I}_n)}{\max(\dot{I}_m, \dot{I}_n)} \quad (5)$$

式中: $\dot{I}_m$ 和 $\dot{I}_n$ 分别为光伏侧、系统侧的电流幅值; $\dot{F}$ 为配电线路两侧实测电流相量的比值, 其幅值范围为 $0 \leq |\dot{F}| \leq 1$, 这意味着任何工况下 $\dot{F}$ 始终在一个单位圆内或单位圆上。正常运行时, 在理想情况下 $\dot{F}$ 的极坐标为 $(1, 180^\circ)$; 若线路上发生区内故障, $\dot{F}$ 会落于单位圆内任意位置。

利用线路两侧电流相量比值 $\dot{F}$ 所表示的电流差动保护判据为:

$$|\dot{F} + 1| > K_0 |\dot{F} - 1| \quad (6)$$

式中: K_0 为电流差动保护比率制动系数。

由式(6)可知, 电流差动保护的临界动作曲线为一个圆心为 $\left(-\frac{1+K_0^2}{1-K_0^2}, 0 \right)$ 、半径为 $\frac{2K_0^2}{1-K_0^2}$ 的圆。因实际应用中电流差动保护比率制动系数的取值范围通常为 $K_0 < 1$, 可以推出 $-\frac{1+K_0^2}{1-K_0^2} < -1$ 。

电流差动保护临界动作曲线如图 3 所示, 在实

线圆外虚线圆内为保护正确动作区，在实线圆内虚线圆内为保护拒动区。实际上，该拒动区域的大小与比率制动系数 K_0 有关，拒动区域边界线方程的表达式为：

$$\rho_a^2 + 2 \frac{1+K_0^2}{1-K_0^2} \rho_a \cos \theta_a + 1 = 0 \quad (7)$$

式中： ρ_a 和 θ_a 为拒动区与动作区的边界线上任意A点的极坐标。

式(7)可用于判断区内故障时电流差动保护的動作情况，假设配电线路两侧的电流幅值比与相角差对应的极坐标为 (ρ_d, θ_d) ，若该点处于保护动作区，则满足下式：

$$\rho_d^2 + 2 \frac{1+K_0^2}{1-K_0^2} \rho_d \cos \theta_d + 1 > 0 \quad (8)$$

由式(8)可知，当 $0 < \rho_d < 1$ 且 $0 < K_0 < 1$ 时，可得：

$$0 < K_0 < \min(1, \sqrt{\frac{1+\cos \theta_d}{1-\cos \theta_d}}) \quad (9)$$

通过分析上式可知，当 $0 < \theta_d < \frac{\pi}{2}$ 时，

$\sqrt{\frac{1+\cos \theta_d}{1-\cos \theta_d}} > 1$ ，即比率制动系数 K_0 在 $0 \sim 1$ 范围内取值保护均可正确动作；而当 $\frac{\pi}{2} < \theta_d < \pi$ 时，

$\sqrt{\frac{1+\cos \theta_d}{1-\cos \theta_d}} < 1$ ，即在 $0 \sim \sqrt{\frac{1+\cos \theta_d}{1-\cos \theta_d}}$ 范围内取值保护才可正确动作。这也就意味着根据光伏电站与等值电网系统侧相角差 θ_d ，实时调节比率制动系数 K_0 ，能够提高电流差动保护动作的可靠性。

为此，本文在传统电流差动保护判据中引入自适应调整函数，使得区内故障下动作区域随制

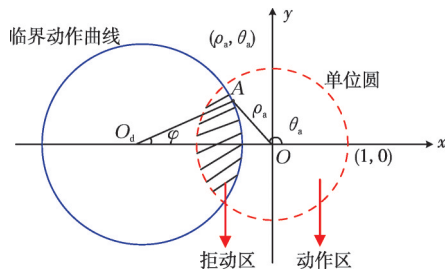


图3 电流差动保护动作特性曲线

Fig.3 Curve of the operating characteristics of current differential protection

动系数的自调整而变大，从而确保光伏电站接入后线路两侧电流相角差大于 90° 时保护仍能够正确可靠动作。所提保护改进判据中，自适应比率制动系数 K_{req} 取值表达式如下：

$$K_{\text{req}} = \begin{cases} 0.6, & 0 < \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ e^{-|\theta|} \sqrt{\frac{1+\cos \theta}{1-\cos \theta}}, & \frac{\pi}{2} < \theta < \pi \end{cases} \quad (10)$$

式中： θ 为线路上光伏电站侧与系统侧电流相角差值； K_{req} 为自适应比率制动系数，其大小随线路两侧电流相角差值 θ 变化而变化； $e^{-|\theta|}$ 为衰减指数。

当线路两侧相角差取值为 $\frac{\pi}{2} \leq \theta < \pi$ 时，比率制动系数的取值不仅会大于0.6，同时也会出现等于0的情况。然而，在实际运行中，比率制动系数取值较大时，会影响差动保护的灵敏性；取值为0时，会影响差动保护的可靠性。因此，为提高差动保护动作的灵敏性和可靠性，本文在自适应比率制动系数中引入了衰减指数 $e^{-|\theta|}$ ，保证线路两侧相角差大于 90° 时，自适应比率制动系数 K_{req} 总在小于0.6且大于0之间取值。 K_{req} 与线路两侧相角差之间的变化规律如图4所示。由图4可以看出，当线路两侧相角差 $\theta \in [\pi/2, \pi)$ 时， K_{req} 的取值总能够小于0.6且大于0，且随着相角差 θ 增大，比率制动系数会逐渐减小，从而解决光伏接入线路后相角差 θ 变大使传统电流差动保护拒动的问题，以实现在不同故障场景、不同光伏接入容量等情况下本文所提出的差动保护改进判据均能够正确动作。

改进的电流保护动作判据表达式如下：

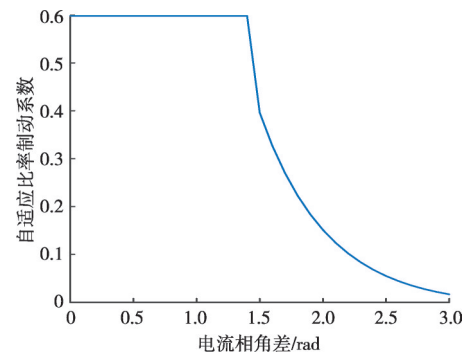


图4 自适应比率制动系数与两侧电流相角差曲线

Fig.4 Curve of the adaptive ratio restraint coefficients versus the phase angle difference of currents on both sides

$$\begin{cases} |\dot{I}_m + \dot{I}_n| > K_{\text{req}} |\dot{I}_m - \dot{I}_n| \\ |\dot{I}_m + \dot{I}_n| > I_{\text{op}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $|\dot{I}_m + \dot{I}_n|$ 为差动电流, 即流过两侧保护装置的电流矢量和; $|\dot{I}_m - \dot{I}_n|$ 为制动电流, 即两侧保护装置的电流矢量差; I_{op} 为启动电流值, 按躲过电流互感器最大不平衡电流整定。具体算法流程如图 5 所示, 步骤如下:

1) 获取保护线路两侧实测电流相量 $\dot{I}_m$ 和 $\dot{I}_n$, 然后利用快速傅里叶变换算法分别计算两侧电流幅值和相位。

2) 根据线路两侧电流幅值和相位计算差动电流 $|\dot{I}_m + \dot{I}_n|$ 和制动电流 $|\dot{I}_m - \dot{I}_n|$ 。

3) 利用相量 $\dot{F} = \frac{\min(\dot{I}_m, \dot{I}_n)}{\max(\dot{I}_m, \dot{I}_n)}$ 幅值比 ρ 和相位差 θ 。

4) 判断 $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ 是否成立, 若成立, K_{req} 取值为 0.6; 若 $\frac{\pi}{2} < \theta < \pi$, 利用式(10)求取自适应比率制动系数 K_{req} 。

5) 进一步根据所得 K_{req} , 利用保护判据式(11), 识别区内外故障。

3 仿真验证

3.1 传统保护适应性分析

从定量角度分析不同容量光伏电站接入对传统电流差动保护的影响, 根据某省电力公司提供的某地区相关数据, 利用 PSCAD/EMTDC 搭建了光伏电站接入配电网的电磁暂态模型, 如图 6 所示。图 6 中左侧为光伏电站, 每个光伏发电单元的额定容量为 1 MW, 光伏电站经汇集母线接入配电线路, 光伏专线的正负序阻抗为 $0.063\ 8 + j0.084\ 7\ \Omega/\text{km}$, 零序阻抗为 $0.211\ 7 + j2.018\ 8\ \Omega/\text{km}$, 光伏专线长度为 10 km。图 6 中右侧为电网等值系统, 系统容量为 100 MVA, 系统的正序等值阻抗为 $4.87 + j18.16\ \Omega$, 零序值阻抗为 $3.01 + j11.23\ \Omega$; 箱变的变比为 0.69 kV/35 kV, 额定容量为 1 MVA, 短路电压百分数为 6.05%, 短路损耗为 105 kW; 升压变压器变比为 35 kV/110 kV, 额定容量为 100 MVA, 短路电压百分数为 5%, 短路损耗为 90 kW。电流

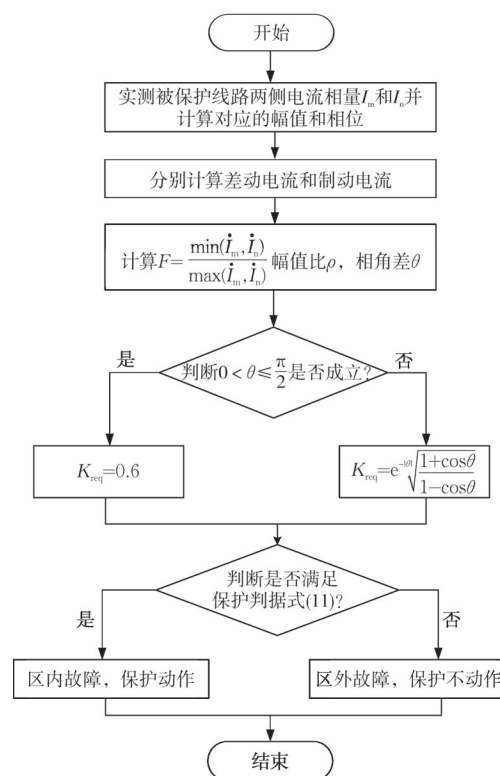


图 5 自适应比率制动系数的差动保护算法流程
Fig.5 Flowchart of the differential protection calculation for the adaptive ratio restraint coefficient

差动保护的比率制动系数 K_0 取值为 0.6; 差动电流启动值 I_{op} 取为 0.2 kA。 f_1 为靠近光伏电站侧的区外故障, f_2 为靠近系统侧的区外故障, f_3 为光伏专线上 15% 处的区内故障, f_4 为光伏专线上 50% 处的区内故障和 f_5 为光伏专线上 80% 处的区内故障。仿真测试中将光伏电站容量分别设置 10 MW、15 MW、17 MW 和 20 MW, 在 $t=1.0\text{ s}$ 时发生三相对称或不对称短路故障。

表 1 为发生区内 f_4 三相故障时不同容量的光伏电站接入后配电线路电流差动保护的动作情况,

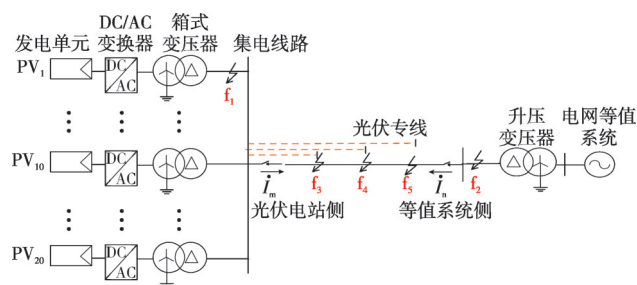


图 6 光伏电站所接配电网拓扑结构
Fig.6 Topology of distribution power grid connected with photovoltaic power station

可以看出光伏电站容量大于等于17 MW(与系统容量比为1:5.882 4)时,被保护线路两侧电流相角差均大于保护临界动作相角差值2.058 rad(比率制动系数 K_0 取值为0.6和两侧电流幅值比为1时,由式(8)计算可得),且线路两侧电流幅值比大于0.381时,传统电流差动保护拒动。

表1 不同容量光伏电站接入对传统电流差动保护的影响

光伏容量/MW	保护线路两侧相角差/rad			幅值比	动作临界角度 差值/rad	动作情况
	A相	B相	C相			
10	1.187	1.187	1.187	0.263	2.058	动作
15	2.294	2.294	2.294	0.320		动作
17	2.464	2.464	2.464	0.381		拒动
20	2.630	2.630	2.630	0.482		拒动

3.2 保护改进判据动作特性分析

为分析光伏电站与所接等值电网短路容量比不同时,改进后的自适应电流差动保护判据的动作性能,设置光伏电站与所接等值电网短路容量比分别为1:10、1:666 7、1:5.882 4与1:5时,故障开始时间为1 s,持续时间为1 s,过渡电阻为10 Ω ,不同故障情景仿真结果分析如下。

3.2.1 不同容量光伏电站接入

图6所示光伏专线上 f_4 处发生AB两相接地故障时,仿真结果如图7、图8所示。由图7可知,当光伏电站与等值电网短路容量比为1:10, $I_{op}=0.2$ kA,比率制动系数 $K_0 \leq 0.6$ 时,传统电流差动保护与改进后的电流差动保护A相 $\dot{I}_{da}=|\dot{I}_{ma}+\dot{I}_{na}|$ 与B相的差动电流 $\dot{I}_{db}=|\dot{I}_{mb}+\dot{I}_{nb}|$ 均大于制动电流 $\dot{I}_{ra}=|\dot{I}_{ma}-\dot{I}_{na}|$ 、 $\dot{I}_{rb}=|\dot{I}_{mb}-\dot{I}_{nb}|$ 与 K_0 的乘积,即保护均能动作。

由图8(a)可知,当光伏电站与等值电网短路容量比为1:5,比率制动系数 $K_0 \leq 0.6$ 时,故障期间光伏所接线路两侧A相和B相差动电流 $\dot{I}_{da}$ 、 $\dot{I}_{db}$ 均小于制动电流 $\dot{I}_{ra}$ 、 $\dot{I}_{rb}$ 与 K_0 的乘积,传统电流差动保护拒动;相比之下,从图8(b)可看出,改进后的电流差动保护A相与B相的差动电流 $\dot{I}_{da}$ 、 $\dot{I}_{db}$ 均大于制动电流 $\dot{I}_{ra}$ 、 $\dot{I}_{rb}$ 与自适应比率制动系数 K_{req} 的乘积,所提保护能够正确可靠动作。

表2为光伏电站所接线路 f_4 处发生ABC三相

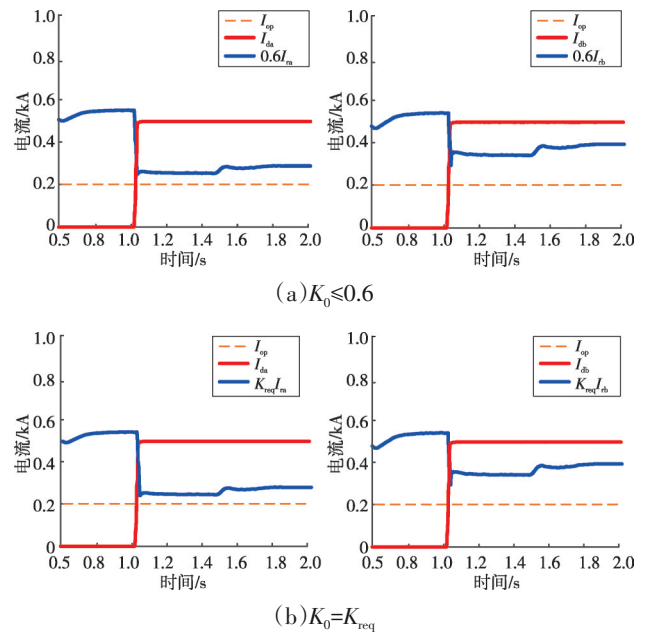


图7 容量比为1:10时所提保护与传统保护对比
Fig.7 Comparison of the proposed protection and traditional protection when the capacity ratio is 1:10

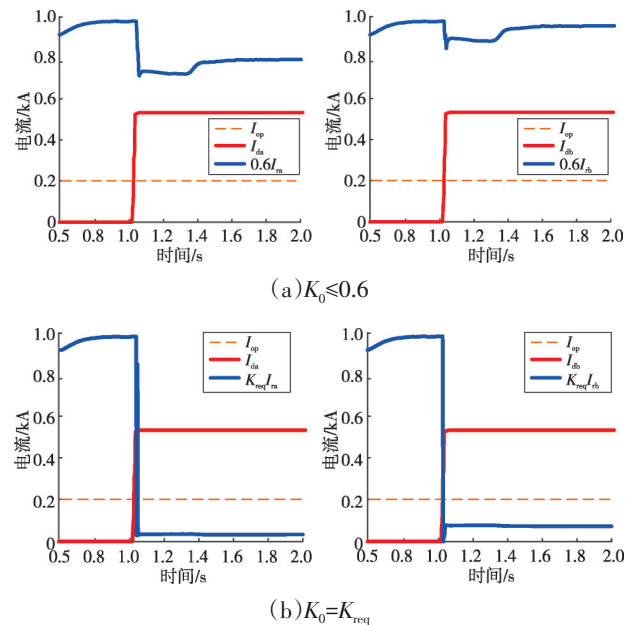


图8 容量比为1:5时所提保护与传统保护对比
Fig.8 Comparison of the proposed protection and traditional protection when the capacity ratio is 1:5

故障时,所提保护与传统保护动作情况的对比。由表2可知,当容量比为1:10与1:6.666 7时。传统保护与改进后的电流差动保护均能正确动作,而当容量比达到甚至超过1:5.882 4时,传统电流差

动保护因光伏电站与等值电网短路两侧电流幅值比、相角差同时增大而拒动，但改进后的自适应电流差动保护能够随着相角差的增大而自适应调整比率制动系数，从而能准确识别区内故障。

表 2 三相短路故障下不同容量光伏接入后传统保护与所提保护动作情况对比

Table 2 Comparison of the operating conditions of traditional protection and the proposed protection under three-phase short-circuit faults with different capacities of photovoltaic integration

容量比	传统电流差动保护				改进后的电流差动保护	
	幅值比	相角差	制动系数 K_0	动作情况	K_{req}	动作情况
	ρ	/rad				
1:10	0.263	1.187	0.6	动作	0.304	动作
1:6.666 7	0.320	2.294	0.6	动作	0.400	动作
1:5.882 4	0.381	2.464	0.6	拒动	0.262	动作
1:5	0.482	2.630	0.6	拒动	0.350	动作

3.2.2 不同故障位置

为验证所提改进型差动保护在不同故障位置下动作性能，分别在图 6 中 f_3 、 f_4 和 f_5 处设置了区内故障和 f_1 和 f_2 处设置了区外故障，假定 $t=1$ s 时发生三相短路故障，光伏接入容量为 17 MW，过渡电阻为 $10\ \Omega$ ，传统电流差动保护与改进后自适应电流差动保护动作性能对比如表 3 所示。由表 3 可知，在 f_1 与 f_5 处发生区外三相故障时，光伏电站所接线路两侧差动电流 I_{da} 小于制动系数与制动电流的乘积，传统电流差动保护和改进后自适应电流差动保护均能可靠不动作。当光伏电站所接线路上 f_3 、 f_4 和 f_5 处发生区内三相短路故障时，差动电流 I_{d} 小于比率制动系数 0.6 与制动电流的乘积，传统电流差动保护拒动；而改进后的自适应电流差动保护通过实时调整比率制动系数 K_{req} ，能够保证区内故障时 K_{req} 与制动电流 I_r 的乘积小于差动电流 I_{d} ，保护正确可靠动作。由上述分析可知，改进后的自适应电流差动保护能够在不同故障场景下正确可靠动作，保护性能优于传统电流差动保护。

4 结语

本文通过推导光伏电站短路电流幅值与相角变化规律，揭示了高比例光伏电站接入后，配电线路两侧电流相量的幅值比会变大，在两侧电流相角差大于 90° 的情况下，传统电流保护极易因差

表 3 不同故障位置时两种保护动作情况对比

Table 3 Comparison of the operating conditions of the two protection methods at different fault locations

故障类型与位置	传统电流差动保护			所提自适应差动保护		
	0.6 倍制动电流/kA	差动电流/kA	动作情况	K_{req} 倍制动电流/kA	差动电流/kA	动作情况
区外故障 f_1	0.407	0	不动作	40.784	0	不动作
区外故障 f_2	0.910	0	不动作	91.234	0	不动作
区内故障 f_3	0.690	0.617	拒动	0.329	0.617	动作
区内故障 f_4	0.651	0.608	拒动	0.282	0.608	动作
区内故障 f_5	0.606	0.601	拒动	0.238	0.601	动作

动电流小于制动系数倍制动电流而发生拒动。针对该问题提出了一种自适应比率制动系数的电流差动保护判据，即根据实测的线路两侧电流相量相角差实时调整比率制动系数，从而确保区内故障下差动电流总大于制动系数倍制动电流，以实现在不同光伏电站与所接等值电网容量比、不同故障类型以及故障位置场景下均能正确识别区内区外故障。

参考文献

[1] 黄雨涵,丁涛,李雨婷,等.碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J].中国电机工程学报,2021,41(增刊1):28-51.
HUANG Yuhan, DING Tao, LI Yuting, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 28-51.

[2] 邵红星.分布式光伏并网导致功率因数变低的案例分析及解决方案[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(4):46-53.
SHAO Hongxing. Case analysis and solution of low power factor caused by distributed photovoltaic grid connection [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(4): 46-53.

[3] 于淼,闫旻睿,万克厅,等.数据驱动的有源配电网运行态势智能感知方法[J].电力建设,2024,45(7):34-53.
YU Miao, YAN Minrui, WAN Keting, et al. Data-driven intelligent situational awareness of active distribution networks [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(7): 34-53.

[4] 于昊正,赵寒杰,李科,等.计及需求响应的分布式光伏集群承载能力评估[J].电力建设,2023,44(2):122-131.
YU Haozheng, ZHAO Hanjie, LI Ke, et al. Carrying capacity evaluation of distribution network for distributed photovoltaic cluster considering user-side demand response [J].

- Electric Power Construction, 2023, 44(2):122-131.
- [5] 毕天姝,李彦宾,贾科,等.基于暂态电流波形相关性的新能源场站送出线路纵联保护[J].中国电机工程学报, 2018, 38(7):2012-2019.
- BI Tianshu, LI Yanbin, JIA Ke, et al. Transient current waveform similarity based pilot protection for transmission lines connected to renewable energy power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7):2012-2019.
- [6] 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.
- [7] 许冠军,梁莹玉,查雯婷,等.方向元件在光伏电站送出线路中的适应性分析[J].电网技术, 2019, 43(5):1632-1639.
- XU Guanjun, LIANG Yingyu, ZHA Wenting, et al. Adaptability analysis of directional relay for transmission line out-sending from photovoltaic power plant[J]. Power System Technology, 2019, 43(5):1632-1639.
- [8] 胡勇,郑黎明,贾科,等.基于Tanimoto相似度的光伏电站送出线路纵联保护[J].电力系统保护与控制, 2021, 49(3):74-79.
- HU Yong, ZHENG Liming, JIA Ke, et al. Pilot protection based on Tanimoto similarity for a photovoltaic station transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3):74-79.
- [9] 高岩,李永丽,陈晓龙,等.基于电流幅值比的有源配电网自适应差动保护原理[J].电力系统及其自动化学报, 2021, 33(2):1-7.
- GAO Yan, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Adaptive differential protection principle for active distribution network based on current amplitude ratio[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(2):1-7.
- [10] 王婷,刘渊,李凤婷,等.光伏T接高压配电网电流差动保护研究[J].电力系统保护与控制, 2015, 43(13):60-65.
- WANG Ting, LIU Yuan, LI Fengting, et al. Research on the current differential protection where PV access to the high voltage distribution network with T-type[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13):60-65.
- [11] 刘幸蔚,李永丽,陈晓龙,等.逆变型分布式电源T接线后纵联差动保护的改进方案[J].电网技术, 2016, 40(4):1257-1264.
- LIU Xingwei, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. An improved scheme of longitudinal differential protection for teed lines with inverter-based distributed generations[J]. Power System Technology, 2016, 40(4):1257-1264.
- [12] 王秀莲,崔云龙,胡广.光伏并网系统送出线路不对称故障的差动保护灵敏度研究[J].电力系统保护与控制, 2017, 45(21):20-26.
- WANG Xiulian, CUI Yunlong, HU Guang. Sensitivity studies on differential protection during the output line of grid-connected photovoltaic systems occur asymmetrical faults[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21):20-26.
- [13] HAN B W, LI H F, WANG G, et al. A virtual multi-terminal current differential protection scheme for distribution networks with inverter-interfaced distributed generators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5):5418-5431.
- [14] MISHRA P, PRADHAN A K, BAJPAI P. A positive sequence relaying method for solar photovoltaic integrated distribution system[C]//2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), July 17-21, 2022, Denver, CO, USA. IEEE, 2022:1.
- [15] ARUNAN A, SIROJAN T, RAVISHANKAR J, et al. Real-time adaptive differential feature-based protection scheme for isolated microgrids using edge computing[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(1):1318-1328.
- [16] 郑黎明,贾科,毕天姝,等.基于结构相似度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):1788-1795.
- 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):1788-1795.
- [17] 陈森,贾科,姚昆鹏,等.基于故障前行波极值时间的柔性直流线路单端量保护方法[J].中国电机工程学报, 2023, 43(10):3742-3757.
- CHEN Miao, JIA Ke, YAO Kunpeng, et al. Single-ended protection method of flexible DC line based on extremum time of fault forward traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10):3742-3757.
- [18] 周家培,赵成勇,李承昱,等.采用电流突变量夹角余弦的直流电网线路纵联保护方法[J].电力系统自动化, 2018, 42(14):165-171.
- ZHOU Jiawei, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. Pilot protection method for DC lines based on included angle cosine of fault current component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14):165-171.
- [19] 晁晨翔,郑晓冬,高飘,等.含高比例光伏配电网的高频阻抗差动保护[J].中国电机工程学报, 2021, 41(20):6968-6978.
- CHAO Chenxu, ZHENG Xiaodong, GAO Piao, et al. High frequency impedance differential protection with high

- proportion of photovoltaic power distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6968-6978.
- [20] CHOWDHURY R, FISCHER N. Transmission line protection for systems with inverter-based resources-part II: solutions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2426-2433.
- [21] 李海锋, 祝新驰, 梁远升, 等. 基于电流控制补偿的高压直流线路快速差动保护[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 111-119.
LI Haifeng, ZHU Xinchu, LIANG Yuansheng, et al. Fast differential protection for HVDC transmission line based on current control compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 111-119.
- [22] LIANG Y Y, LI W L, XU G J. Performance problem of current differential protection of lines emanating from photovoltaic power plants [J]. Sustainability, 2020, 12(4): 1436.
- [23] 梁莹玉, 卢正杰. 基于补偿系数的有源配电网自适应电流差动保护[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2268-2275.
LIANG Yingyu, LU Zhengjie. Adaptive differential protection principle based on compensation coefficient for active distribution network[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2268-2275.
- [24] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [25] 刘素梅, 王丹枫, 李伟, 等. 适应电流差动保护的光伏电站边界接入容量分析[J]. 可再生能源, 2023, 41(5): 644-652.
LIU Sumei, WANG Danfeng, LI Wei, et al. The boundary capacity of photovoltaic power plant adapted to current differential protection [J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(5): 644-652.
-
- 收稿日期:** 2024-06-14; **修回日期:** 2024-09-27
- 作者简介:**
陈水耀(1976), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制。
刘素梅(1981), 女, 博士, 副教授, 主要从事新能源电力系统保护与控制。(通信作者)
- (本文编辑: 张瑞敏)