

基于光伏故障暂态出力控制及容量计算的 自适应重合闸方法

翟文辉¹, 田晓煜¹, 亢朋朋¹, 陈 帅², 孔嘉靖², 贾 科²

(1. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830018; 2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要:保护跳闸后,其他线路的光伏电源可能带故障持续运行,给故障点馈流并导致瞬时性故障无法熄弧,引发重合闸失败。为此,提出一种基于光伏故障暂态出力控制及容量计算的自适应重合闸方法。分析了故障电弧特性并提出电弧电阻线性化的等效方法,在此基础上明确了光伏电源容量对电弧特性的影响,进而计算了光伏暂态出力下电弧满足自熄的边界条件,通过控制光伏故障期间的暂态出力避免瞬时性故障无法熄弧导致重合闸失败的问题。仿真验证表明所提方法对于不同位置、过渡电阻的瞬时性故障都能有效防止其电弧无法自熄,提高新能源发电系统供电可靠性。

关键词:自适应重合闸;分布式光伏;光伏暂态出力;新能源孤岛系统

中图分类号:TM77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202505004

0 引言

“双碳”目标下,我国近年来大力发展光伏发电^[1]。海量光伏接入电力系统,山东、江苏等地甚至出现光伏出力高峰时期倒送电现象。最新发布的光伏发电并网逆变器技术要求规定光伏电站应具备低电压穿越能力,且故障穿越优先级高于防孤岛保护^[2]。这导致保护跳闸后下游分布式光伏可能持续带故障运行,向故障点提供电路电流使得瞬时性故障电弧无法熄灭从而发展成为永久性故障^[3],造成重合闸失败甚至退出运行,难以保证供电的可靠性,亟需研究适用于含分布式光伏接入的新型重合闸技术。

国内外学者针对含分布式光伏的重合闸技术已进行了大量研究,主要可分为3类^[4],即延长动作时间^[5]、增设检无压或检同期^[6-7]和自适应重合闸^[8-9]。延长动作时间方法是与分布式光伏低电压穿越和防孤岛保护相配合,在发生跳闸故障后经过固定的延时时间(2.5~3 s)后重合闸,旨在等待所有分布式光伏跳闸脱网以避免分布式光伏接入给重合闸带来的影响。但该方法会导致分布式光伏大量脱网,无法充分发挥分布式光伏接入的积极作用,不能快速地恢复供电。增设检无压或检同期方法实质上也是等待分布式光伏全部脱网,保证分布式光伏与故障点

隔离后进行重合闸,同样无法保证快速的恢复供电与分布式光伏的有效利用。

自适应重合闸技术在重合闸前首先判断故障性质并确保只重合闸于瞬时性故障,且本文利用故障点电弧是否熄灭来区分瞬时性故障和永久性故障^[10]。不同于带并联电抗器的输电网络,在跳闸后可以利用线路残余电气量判断故障性质,配电网络电气量在线路跳闸后迅速衰减,无法利用故障后自身电气量进行故障性质判别^[11]。因此现有适用于配电系统的自适应重合闸主要是附加设备法,通过向跳闸后的系统中投入附加设备使得无源线路拥有被检测的电气量。然而投入额外的设备会增加成本,而且注入信号可能会干扰电力载波通信,严重时会导致部分依靠载波通信的设备误动作。上述重合闸均未考虑附加设备后注入信号对电弧自熄的影响,默认瞬时性故障发生时电弧一定能够熄灭,实际上电弧的形成靠的是电压的击穿,而能否稳定存在则要看电流能否维持^[12],当故障电流过大时可能导致电弧无法自熄从而发展成永久性故障。

基于此,为了解决现有自适应重合闸存在的瞬时性故障电弧无法自熄导致重合闸于故障的问题,本文提出一种基于光伏故障暂态出力控制及容量计算的自适应重合闸方法:对故障电弧特性进行分析并提出电弧电阻线性化的等效方法,明确了断路器跳闸后分布式光伏容量对电弧特性的影响;通过控制分布式光伏故障期间的暂态出力避免瞬时性故障电弧无法熄灭的问题,进一步利用故障电流幅值在熄弧前、后的差异构造熄弧时刻判据,在检测到电弧熄灭后经整定延时断路器重合。仿真验证表明本文所提方法能够有效辨识故障性质,极大程度上避免了因分布式光伏接入导致的瞬时性故障无法熄弧引

收稿日期:2024-12-18;修回日期:2025-04-21

在线出版日期:2025-05-12

基金项目:国家电网有限公司科技项目(SGXJ0000TKJS2310434);
国家重点研发计划项目(2022YFB4202302)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(SGXJ0000TKJS2310434) and the National Key Research and Development Program of China(2022YFB4202302)

起重合闸失败的问题,有利于系统的快速恢复。

1 电弧模型的建立及线性化处理

1.1 电弧模型

我国对配电网供电可靠性的要求日益提高,其中小电阻接地方式在供电可靠性要求最高的A类供电区域中得到了广泛应用^[13],且配电网高发的单相接地故障中以带电弧的瞬时性故障最为常见^[14]。单相接地故障一般由过电压造成的线路绝缘损坏或者绝缘子闪络、树木与线路过近引起放电等引起,其特征在于故障支路由短间隙电弧和导电介质共同构成,因此需要将故障支路建模为非线性电弧和固定阻值的塔基电阻串联^[15],如图1所示。图中: R_f 为固定阻值的塔基电阻; R_{arc} 为表示电弧特性的非线性电阻; I_f 为故障电流; u_{arc} 和 u_f 分别为电弧电压和故障支路电压。

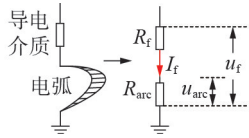


图1 电弧故障等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit diagram of arc fault

本文选用对数电弧模型^[16]描述电弧动态特性,对数电弧模型不仅控制方程简单,且数值求解中每个时刻的电弧电压都与前一时刻的电弧参数独立,无须迭代计算,其控制方程为:

$$u_{arc} = \text{sgn}(I_f) U_T \ln \left(\frac{|I_f|}{I_s} + 1 \right) \quad (1)$$

式中: U_T 和 I_s 分别为由线路参数决定的电压、电流常数; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。

当线路发生单相接地故障时,故障电压不仅包含电弧电压,还包含线性塔基电阻的压降,因此故障支路电压方程为:

$$u_f = u_{arc} + R_f I_f \quad (2)$$

式(2)中的故障支路电压 u_f 可用断路器负荷侧测量电压近似表示^[4],光伏发电系统接入配电网相关国标规定并网的光伏发电系统应上传电流信息^[2],且负荷侧一般配置馈线终端单元(feeder terminal unit, FTU)以获取负荷电流信息,由于测量光伏及负荷电流数据不受故障位置影响,所以由其计算所得故障电流数据也不受故障位置影响。断路器跳闸后,下游系统中仅由分布式光伏与本地负荷形成孤岛系统持续带故障运行,由此便可以得到故障电流 I_f ,待定参数有电压常数 U_T 、电流常数 I_s 和塔基电阻 R_f 。因此,只需要获取故障稳定情况下3个以上的采样点值即可完备求取式(2)中的未知量^[16],即获取塔基电阻阻值和对数电弧模型,从而方便接下来分析

分布式光伏对电弧特性的影响。

1.2 电弧电阻的线性等效

由于电弧具有非线性特性,发生单相接地故障时其故障状态方程为非线性超越方程,直接求解较为困难,因此需要对非线性电弧电阻等效以方便通过数学方法进行求解。考虑到电弧具有周期特性,且电弧周期被划分为预击穿阶段、燃弧阶段和熄弧阶段^[17]3个阶段。由于电弧处于预击穿阶段和熄弧阶段时电阻变化较大,但维持时间占电弧周期比重较小;当电弧处于稳定燃弧阶段时电阻变化较小,但维持时间占电弧周期比重较大。因此,考虑用电弧电阻在1个周期内的平均值来等效非线性电弧电阻,不仅便于求解故障特性且能够获得等效的故障特性。故障支路等效电阻为:

$$R_{equ} = \frac{\int R_{arc} dt}{T_s} + R_f \quad (3)$$

式中: R_{equ} 为故障支路整体等效过渡电阻; T_s 为单个电弧周期。

利用对数电弧模型描述电弧特性并对非线性电弧电阻进行线性化处理可将故障过渡电阻等效为1个恒定阻值电阻,从而求解分布式光伏孤岛运行故障特性,分析分布式光伏容量对电弧自熄特性的影响。对非线性电阻进行线性化处理的合理性将在第3章中进行验证。

2 分布式光伏对电弧特性影响分析

含分布式光伏接入的配电网可用如附录A图A1所示的单馈线辐射状系统简单表示,光伏系统直流侧配置卸荷电路^[18]以吸收限制光伏出力时其直流侧不平衡功率,主站与各分布式光伏系统及FTU相互通信。在瞬时性单相接地故障发生后,系统侧继电保护装置启动,导致断路器跳闸。跳闸后分布式光伏继续供电且故障持续存在,因此下游系统中仅由分布式光伏与本地负荷形成孤岛系统持续带故障运行。

2.1 分布式光伏带故障运行特性解析

将跳闸后下游系统中的分布式光伏等效为压控电流源,配电变压器及负荷等效为1条电阻-电感-电容并联支路进行故障特征分析,这是孤岛特性研究的常用分析手段^[19],则故障跳闸后孤岛系统等效电路如图2所示。图中: I_{pv} 为分布式光伏等效输出电流; U_{isl} 为孤岛系统电压; Z_L 为负荷支路的等效阻抗,其中 R_L 为等效电阻, L_L 为等效电感, C_L 为等效电容; I_L 为负荷支路的等效输出电流; R_f 、 X_f 分别为分布式光伏出口至故障点处的线路电阻、电抗。

由于逆变器与交流系统之间一般使用YNd接线的换流变压器联结,零序电流在变压器内形成环

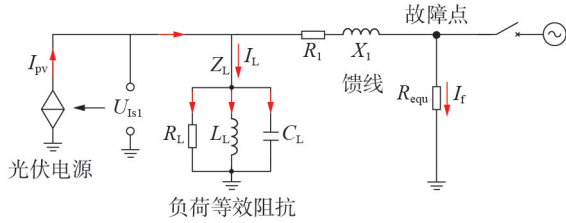


图2 断路器下游光伏孤岛系统等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagram of photovoltaic island system downstream to circuit breaker

流无法流出,故逆变器输出零序电流为0。在不对称故障穿越过程中常用的控制方式主要包括抑制负序电流和抑制功率2倍频波动2种,本文在不对称故障穿越时对光伏逆变器采用抑制负序的控制策略,因此故障期间分布式光伏输出负序电流为0。

现有文献^[20]指出光伏逆变器输出电流受系统电压的控制,因此可以将分布式光伏电源等效为压控电流源,具体推导过程见附录B,分布式光伏等效输出电流标么值为:

$$I_{pv} = \begin{cases} 1.2 & U \leq 0.65 \text{ p.u.} \\ -0.8U + 1.72 & 0.65 \text{ p.u.} < U \leq 0.9 \text{ p.u.} \\ 1 & 0.9 \text{ p.u.} < U \leq 1.1 \text{ p.u.} \\ 0.3U + 0.67 & 1.1 \text{ p.u.} < U \leq 1.3 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (4)$$

式中:\$U\$为故障电压标么值。

对于电力系统中非对称故障的分析与计算一般采用对称分量法进行处理,该方法利用系统正、负和零序网络所构成的复合序网图及发生故障时的边界条件,先对电气量的序分量进行求解进而求出其三相值。当图2所示网络中发生单相接地故障时,其边界方程为:

$$\begin{cases} I_f^+ = I_f^- = I_f^0 \\ U_f^+ + U_f^- + U_f^0 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:\$I_f^+\$、\$I_f^-\$、\$I_f^0\$分别为故障电流的正、负、零序分量;\$U_f^+\$、\$U_f^-\$、\$U_f^0\$分别为故障电压的正、负、零序分量。由此可得光伏孤岛系统发生单相接地故障时的复合序网图如图3所示。图中:\$Z_1^+\$、\$Z_1^-\$、\$Z_1^0\$分别为线路的正、负、零序阻抗。

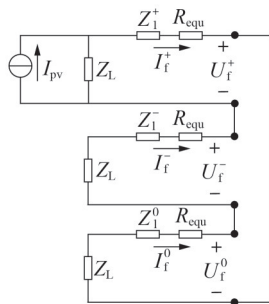


图3 单相接地故障等效序网图

Fig.3 Equivalent sequence network of single-phase-to-ground fault

求解图3可得:

$$I_f^+ = I_f^- = I_f^0 = \frac{I_{pv} Z_L}{3Z_L + Z_1^+ + Z_1^- + Z_1^0 + 3R_{equ}} \quad (6)$$

由此可得,故障入地电流幅值为:

$$I_f = 3I_f^+ = 3 \times \frac{I_{pv} Z_L}{3Z_L + Z_1^+ + Z_1^- + Z_1^0 + 3R_{equ}} = 3 \times \frac{Z_L}{3Z_L + Z_1^+ + Z_1^- + Z_1^0 + 3R_{equ}} \times K_1 \times \frac{S_{pv}}{\sqrt{3} U_N} \quad (7)$$

式中:\$K_1\$为分布式光伏电流生长系数,其值由孤岛系统电压决定,取值范围为1~1.2;\$S_{pv}\$为分布式光伏额定容量;\$U_N\$为系统额定电压,\$U_N=10 \text{ kV}\$。

2.2 分布式光伏故障容量计算

故障跳闸后故障点仅由分布式光伏馈流,由于光伏并网逆变器故障电流限幅的作用,其故障电流仅为额定电流的1.2~1.5倍。由于电弧的形成靠的是电压的击穿,而能否稳定存在则要看电流能否维持,因此要通过故障电流大小来判别故障电弧是否自熄,所以本文主要关心故障电流大小对电弧自熄的影响。现有研究^[14,21]表明:10 kV系统发生单相弧光接地故障时,电弧自熄的边界电流为15 A,且该电流大小受系统故障类型影响。当故障入地电流小于15 A时,接地电弧在450 ms内熄灭的概率为100%,瞬时性故障消失,在电弧熄灭后只需经过短暂的60 ms躲过熄弧去游离后即可进行重合闸操作;故障入地电流大于15 A时,瞬时性故障电弧无法自熄继而持续燃弧最后发展为永久性故障。

为了求得分布式光伏带故障运行时满足电弧自熄条件的最大容量,将式(7)改写为:

$$S_{lim} = \frac{I_{lim} \times \sqrt{3} U_N K_1}{K_z} \quad (8)$$

式中:\$S_{lim}\$为满足自熄弧条件的分布式光伏最大容量;\$K_z = \left(3 + \frac{Z_1^+ + Z_1^- + Z_1^0 + 3R_{equ}}{Z_L} \right) / 3\$,与故障位置有关;

\$I_{lim}\$为电弧自熄的边界电流,取为15 A^[14,21]。

由式(8)可知,影响跳闸后下游分布式光伏带故障运行时电弧是否自熄对应的光伏容量大小的因素主要有3个,即\$I_{lim}\$、\$K_1\$、\$K_z\$。其中,对于10 kV系统,电弧自熄的边界电流\$I_{lim}\$为15 A;由于\$K_1\$与分布式光伏带故障运行时的系统电压水平有关,而在未求取应限制的光伏容量前对于限制后系统的电压水平求取较为困难,同时考虑到对所求分布式光伏容量设置一定的裕度以保证电弧可以自熄,取\$K_1=1.2\$;\$K_z\$受分布式光伏到故障点距离的影响,可通过现有故障测距方法^[22]得到具体故障位置,进而求取\$K_z\$。在故障发生后,分布式光伏带故障运行时根据式(8)计算的光伏容量主动限制孤岛系统光伏出力从而使得在该故障情况下瞬时性故障电弧可以自熄,避免故障的

进一步发展。

国标^[23-24]规定对于电力系统故障期间没有脱网的光伏电站,其有功功率在故障清除后应以至少每秒30% P_N (P_N 为额定功率)的功率变化率恢复至正常发电状态,而在故障期间脱网的光伏电站在故障清除后不仅需要经过一定的延时才可恢复并网,而且其恢复并网速率在每分钟10% P_N ~50% P_N 内可调。由此可见,与未脱网光伏相比,脱网光伏在故障清除后出力恢复至正常水平所用时间大幅增加。因此,通过控制光伏出力使得电弧快速熄灭从而进行重合闸,相比于传统经2.5~3 s延时后等待分布式光伏全部脱网后动作的传统重合闸,不仅避免了瞬时性故障进一步发展为永久性故障,而且有利于故障清除后系统快速恢复至正常运行状态。

2.3 熄弧时刻的判定

结合以上故障特性分析可知,当发生瞬时性故障且电弧未熄灭时故障电流很大,在瞬时性电弧熄灭后,由于故障电阻近似无穷大,所以此时故障电流很小,近似为0;而当系统发生永久性故障时,即使主动限制光伏出力后故障仍无法消失,因此在规定时间内无法检测到故障电流跌落到近似为0。考虑到实际检测故障电流不可能完全为0,因此为检测电流幅值设置一定裕度,如式(9)所示。

$$|I_f| \leq \varepsilon \quad (9)$$

式中: ε 取为零点附近的值,本文取为0.1 A。

由于断路器跳闸后下游系统中仅由分布式光伏与本地负荷形成孤岛系统持续带故障运行,因此在获得光伏电站上传的光伏电流数据及FTU上传的负荷电流数据后便可得到故障电流 I_f 。

考虑到重合闸动作时间应与分布式光伏系统低电压穿越时间相配合,可能出现分布式光伏达到并网极限后脱网,下游系统无压持续检测失去意义的情况。国标^[2]规定对于故障后分布式光伏系统电压跌落至0.2 p.u. 以上的情况,光伏系统应能连续不脱网运行625 ms,本文所提重合闸方法的重合闸时间在0.5 s以内,此时重合闸动作不受低电压穿越影响;对于故障后分布式光伏系统电压跌落至0.2 p.u. 及以下的情况,光伏系统应能至少连续不脱网运行150 ms,此时分布式光伏可能存在并网和脱网2种状态,若分布式光伏均达到并网极限后脱网,则下游系统无压,后续计算失去意义。因此,以断路器负荷侧正序测量电压幅值 $|U^+|$ 近似作为光伏系统并网点电压幅值^[4],当检测到故障后 $|U^+| > 0.2$ p.u. 时,进入正常重合闸流程;当检测到 $|U^+| \leq 0.2$ p.u. 时,若光伏系统处于并网运行状态,则可进入正常重合闸流程,若下游系统中分布式光伏均低电压穿越失败,变为无源网络,则采用固定延时重合闸方法,计及断路器

复归耗时和熄弧去游离时间,经0.3 s^[4]后重合闸。

针对分布式光伏接入配电网后持续给故障点馈流导致瞬时性故障发展成永久性故障的问题,通过对分布式光伏带故障运行特性解析得到能满足自熄弧的光伏容量,由各分布式光伏系统实时上传的运行时的功率信息获取运行电网中分布式光伏总容量,若系统光伏容量不满足自熄弧条件则在各分布式光伏系统中按其额定容量等比例分配需要接入的限制容量,从而满足自熄弧条件,大幅减小瞬时性故障发展成为永久性故障的可能性,极大地提高了重合闸概率。

自适应重合闸流程如附录C图C1所示,具体步骤如下。

1)发生单相接地故障系统跳闸后,读取并检测断路器负荷侧正序测量电压幅值 $|U^+|$,若 $|U^+| \leq 0.2$ p.u. 且系统中分布式光伏均故障穿越失败处于脱网状态,则计及断路器复归耗时和熄弧去游离时间,经0.3 s后重合闸,否则进入步骤2)。

2)根据保护装置测量数据,由式(8)计算故障电流 I_f 及满足电弧自熄的分布式光伏容量 S_{lim} 。

3)若分布式光伏容量 S_{RES} 满足 $S_{RES} \leq S_{lim}$,则电弧满足自熄弧条件,无须限制光伏出力;否则,在各分布式光伏系统中按各额定容量等比例分配需接入的限制容量使电弧满足自熄弧条件。

4)在调整新能源出力容量后持续检测故障电流大小,若在 T_{lim} 时限内故障电流满足熄弧判据,则表明故障为瞬时性故障且故障已经消失,此时经过60 ms的熄弧去游离时间即可进行重合闸操作;否则认为是永久性故障从而闭锁重合闸。

3 仿真实验

以新疆某地区含分布式光伏接入的典型配电网拓扑为例,在PSCAD/EMTDC中搭建如图A1所示的含2座100 kW的分布式光伏电站接入10 kV配电馈线的仿真系统,仿真系统中分布式光伏所在配电馈线长度为20 km,选取的故障位置为 F_1 (断路器下游出口,线路首端)、 F_2 (线路中间位置)及 F_3 (线路末端)。其他仿真参数如附录C表C1所示。

3.1 电弧电阻的线性化等效验证

对非线性电弧电阻进行线性化等效后可以分析分布式光伏出力功率对电弧特性的影响,继而得到分布式光伏带故障运行时满足电弧自熄条件的最大光伏容量,因此需要验证对非线性电弧电阻进行线性化等效后进行故障特征分析的正确性,分别对断路器跳闸后下游光伏带故障运行系统在非线性电弧模型及等效线性模型下的故障特征进行对比。以在馈线 F_1 处发生瞬时性单相接地故障为例,对不同非线性电弧电阻及等效线性电弧电阻下故障入地电流

幅值进行比较,结果如附录C表C2所示。由表可知,在不同过渡电阻阻值下,等效前、后故障入地电流误差均小于1%。因此,在分布式光伏带故障运行特性解析时可以利用线性化等效后的电弧电阻代替非线性电弧电阻进行故障特性分析。

3.2 分布式光伏带故障运行特性解析验证

为了验证跳闸后分布式光伏带故障运行时故障特性解析的正确性,以下游断路器出口 F_1 处发生瞬时性单相接地故障为例,分别对比不同过渡电阻及不同光伏容量情况下故障入地电流计算值与仿真值,其结果如附录C表C3所示。由表可知,在不同过渡电阻及不同光伏容量的情况下,故障入地电流计算值与仿真值的误差均在5%以内,因此验证了式(7)与式(8)的正确性,可以通过控制分布式光伏故障期间的暂态出力调整故障电流大小,同时也间接证明了本文对非线性电弧电阻进行线性化处理的合理性。

3.3 重合闸性能验证

本文分别对跳闸后分布式光伏系统发生瞬时性故障和永久性故障2种情况下的重合闸动作情况进行仿真验证。以线路中点 F_2 处发生A相接地故障为例,设故障发生在系统运行0.5 s时,故障发生后0.01 s三相断路器跳闸动作,自此下游分布式光伏带故障运行并持续给故障点馈流。永久性故障下故障持续时间为无穷大;瞬时性故障下,若不满足熄弧条件,则故障持续存在继而发展成永久性故障,否则故障在一定时限内消失。图4给出了系统发生不同故障时,断路器跳闸后重合闸启动判据的仿真结果。

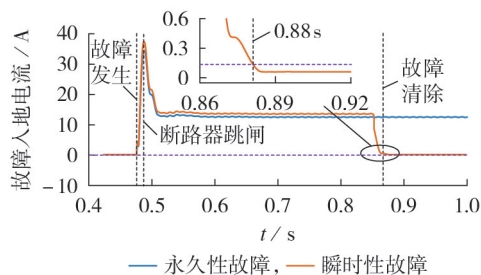


图4 不同故障性质下重合闸性能验证

Fig.4 Verification of reclosing performance under different fault natures

在故障发生后断路器跳闸前,由于主网馈流的原因导致故障电流急剧增加,在故障后100 ms断路器启动后,故障点仅由下游光伏馈流且其故障电流大小已由解析得出。当发生永久性故障时,通过控制分布式光伏故障期间的暂态出力使得故障电弧满足自熄弧条件,但是在对应检测时限内无法检测到故障电流满足式(9),因此判定为永久性故障从而闭锁重合闸;当发生瞬时性故障时,通过式(8)计算可知,应将总光伏出力限制到165 kW使得电弧具备快

速熄灭的条件,由仿真结果可知,在故障发生后388.2 ms时检测到故障电流小于0.1 A,从而判定故障为瞬时性故障,经60 ms的熄弧去游离时间后即可进行重合闸操作。

在断路器跳闸后,本文所提故障检测判据可有效辨识瞬时性/永久性故障。在瞬时性故障情况下,相比目前需2.5~3 s延时的工程方法,本文所提方法可有效地将重合闸延时缩短至0.5 s以内,大幅缩短了重合闸时间,尤其避免了由于新能源接入配电网后持续向故障点馈流导致瞬时性故障发展成永久性故障的情况,极大地提高了供电可靠性。

为了验证本文所提自适应重合闸方法具有良好的适应性,针对不同故障位置及不同过渡电阻的情况进行大量的仿真分析。在不同的故障位置(F_1 、 F_2 、 F_3)和不同过渡电阻(5、25、50、100 Ω)情况下,本文所提自适应重合闸方法的动作情况如表1所示。表中:○表示该相无故障。由表可得,该判别方法基本不受故障位置及过渡电阻的影响,具有良好的辨识性,在各种情况下均能促使重合闸正确动作,极大地提高了供电可靠性。

表1 不同过渡电阻及不同故障位置下,本文所提自适应重合闸方法的性能

Table 1 Performance of proposed adaptive reclosing method under different fault locations and different transition resistances

故障位置	过渡电阻/ Ω	检测结果	检测时间/ms	重合闸指令
F_1	5	○	388.2	448.2 ms 重合闸
	25	○	385.6	445.6 ms 重合闸
	50	○	379.7	439.7 ms 重合闸
	100	○	377.9	437.9 ms 重合闸
F_2	5	○	402.3	462.3 ms 重合闸
	25	○	395.6	455.6 ms 重合闸
	50	○	389.5	449.5 ms 重合闸
	100	○	384.3	444.3 ms 重合闸
F_3	5	○	386.5	446.5 ms 重合闸
	25	○	384.6	444.6 ms 重合闸
	50	○	378.4	438.4 ms 重合闸
	100	○	379.3	439.3 ms 重合闸

3.4 不同测距误差下自适应重合闸性能

故障测距算法实际存在一定的误差,影响故障测距精度,本文所提自适应重合闸方法应保证即使在测距误差存在的情况下也能使得重合闸正确动作。现有故障测距算法^[22]能有效计算故障点位置,且误差均在5%以内,本节分别设置5%、10%的测距误差场景验证所提重合闸方法性能。以不同故障位置发生过渡电阻为5 Ω 的瞬时性故障为例进行分析,本文所提自适应重合闸方法的动作情况如附录C表C4所示。

由于本文求取分布式光伏带故障运行情况下满

足电弧自熄条件的最大容量时受线路阻抗影响较小,受测距误差影响更是可以忽略不计,因此可以有效避免测距误差的影响。由表C4可知,不同测距误差对重合闸的动作时间的影响可以忽略不计,在不同位置发生瞬时性故障时依然能够正确重合闸。

3.5 与现有重合闸方法的性能对比

本文所提自适应重合闸方法与现有增长延时的重合闸方法^[5]的对比如表2所示。对于瞬时性故障情况,本文所提方法可以通过控制分布式光伏出力使得电弧快速熄灭,在检测到电弧熄灭后快速重合闸,延时比现有方法短,且避免了电弧持续发展造成重合闸失败的情况,极大地提高了重合闸性能;通过控制分布式光伏故障期间的暂态出力使得重合闸期间光伏始终处于并网状态,有利于系统运行状态的快速恢复。

表2 本文所提重合闸方法与现有方法对比

Table 2 Comparison between proposed adaptive reclosing method and existing method

对比项	本文所提重合闸方法	现有方法
瞬时性故障重合闸情况	电弧快速熄灭后快速重合闸(通过主动限制光伏出力)	电弧无法自熄导致重合闸失败
瞬时性故障重合闸延时	0.4~0.5 s自适应重合闸延时	恒定2.5~3 s重合闸延时
重合闸后新能源并网情况	瞬时性故障重合闸后新能源保持并网	全部脱网

4 结论

针对分布式光伏接入后由于光伏持续给故障点馈流导致的瞬时性故障电弧无法自熄继而发展为永久性故障的问题,本文提出了基于光伏故障暂态出力控制及容量计算的自适应重合闸方法,通过控制分布式光伏故障期间的暂态出力降低故障电流从而使得电弧可以自熄,在故障可靠清除后进行重合闸。基于实际系统参数搭建仿真模型进行验证,结果表明,本文所提方法能够可靠应对分布式光伏接入的配电系统发生不同故障位置、过渡电阻的瞬时性故障时电弧无法自熄的问题,相比于工程中固定增长延时的重合闸方法,该方法可有效避免故障的进一步发展,有利于系统快速恢复供电。

但毋庸置疑的是,本文研究目前尚存在不足之处,例如本文所提重合闸方法无法适用于相间故障、两相接地等故障场景,对配电网现有的通信条件有一定要求,后续研究将针对这些问题进行更深入的探索分析。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 金凡凡,郭瑞鹏,林振智,等.考虑配电网供电可靠性与经济性的FTU优化配置[J].电力自动化设备,2024,44(12):132-

139.

JIN Fanfan, GUO Ruipeng, LIN Zhenzhi, et al. Optimal placement of FTUs considering power supply reliability and economy of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(12): 132-139.

[2] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 光伏发电系统接入配电网技术规定: GB/T 29319—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.

[3] 郭楠, 白丽娜. 光伏电源接入对继电保护及重合闸的影响与建议[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(增刊1): 138-140.

GUO Nan, BAI Lina. Impact of grid-connected photovoltaic power on relay protection and reclosure together with related suggestions[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2016, 28(S1): 138-140.

[4] 杨彬, 贾科, 李俊涛, 等. 基于电压上升限时检测的含新能源配电网自适应重合闸[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 66-74.

YANG Bin, JIA Ke, LI Juntao, et al. Adaptive reclosing of distribution network with renewable energy based on voltage rise time limit detection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 66-74.

[5] BARAN M E, HOOSHYAR H, SHEN Z, et al. Accommodating high PV penetration on distribution feeders[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 1039-1046.

[6] 张海玉, 刘闯, 晁勤, 等. 具有LVRT能力的并网光伏系统继电保护问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 53-60.

ZHANG Haiyu, LIU Chuang, CHAO Qin, et al. Research on relay protection issues of grid-connected photovoltaic system with LVRT ability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 53-60.

[7] 胡雪凯, 张乾, 胡文平, 等. 分布式光伏对线路自动重合闸的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 75-82.

HU Xuekai, ZHANG Qian, HU Wenping, et al. Analysis of the influence of distributed photovoltaic on automatic reclosing[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 75-82.

[8] ZHU K, LV R D. A three-phase adaptive reclosure technology for distribution feeders based on parameter identification[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(6): 2173-2181.

[9] 廖宏宇, 康小宁, 袁燕磊, 等. 利用注入信号的配电网自适应三相重合闸研究[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2623-2630.

LIAO Hongyu, KANG Xiaoning, YUAN Yanlei, et al. Adaptive three-phase reclosing device of distribution network based on injected signals[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2623-2630.

[10] 索南加乐, 梁振锋, 宋国兵. 自适应熄弧时刻的单相重合闸的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 37-41.

SUONAN Jiale, LIANG Zhenfeng, SONG Guobing. Study of single-phase reclosure with adaptive secondary arc extinction[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 37-41.

[11] 蒋江波, 解超, 李凤婷, 等. 适用于带并抗的同杆双回线接地故障相自适应重合闸策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 12-24.

JIANG Jiangbo, JIE Chao, LI Fengting, et al. Phase-separation adaptive autoreclosing strategy for ground faults on double-circuit transmission lines with shunt reactors[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 12-24.

[12] 于永波. 配电网弧光接地故障检测与早期故障辨识[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.

YU Yongbo. Fault detection and early fault identification of distribution network arc grounding[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.

- [13] 戴志辉,于礼瑞,何静远,等. 适应IIDG接入的就地型馈线自动化改进策略[J]. 电力自动化设备,2023,43(10):184-191.
DAI Zhihui,YU Lirui,HE Jingyuan,et al. Improvement strategy of local feeder automation for IIDG integration[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(10):184-191.
- [14] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社,2000:72-76.
- [15] 张超,王宾,张海,等. 中性点直接接地电网单相串联铁磁谐振检测与类型辨识[J]. 电力系统自动化,2022,46(19):172-179.
ZHANG Chao,WANG Bin,ZHANG Hai,et al. Detection and type identification of single-phase series ferroresonance in neutral point solid grounding power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(19):172-179.
- [16] 孙月琴,倪江,王宾,等. 应用于输电线路单端测距的高阻接地故障电弧模型分析[J]. 电力系统自动化,2016,40(22):86-92.
SUN Yueqin,NI Jiang,WANG Bin,et al. Transmission line high-impedance fault modeling analysis for single-end fault location[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(22):86-92.
- [17] 瞿科,张文海,肖先勇,等. 基于波形衰减因子的电缆接头绝缘早期故障状态监测[J]. 高电压技术,2022,48(1):318-327.
QU Ke,ZHANG Wenhui,XIAO Xianrong,et al. Condition monitoring for incipient faults of cable joint insulation based on waveform attenuation factor[J]. High Voltage Engineering,2022,48(1):318-327.
- [18] 秦晓波. 基于两种直流侧卸荷电路的并网光伏发电系统LVRT对比分析[J]. 陕西电力,2016,44(7):20-24.
QIN Xiaobo. Dynamic characteristics comparative analysis of PV system LVRT based on two different crowbar circuit[J]. Shaanxi Electric Power,2016,44(7):20-24.
- [19] 张兴,曹仁,等. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 北京:机械工业出版社,2018:289-292.
- [20] 贾科,侯来运,毕天姝,等. 基于故障区域局部迭代的工程实用化新能源短路电流计算[J]. 电力系统自动化,2021,45(13):151-158.
JIA Ke,HOU Laiyun,BI Tianshu,et al. Practical engineering calculation of short-circuit current for renewable energy based on local iteration of fault area[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(13):151-158.
- [21] 颜湘莲,陈维江,贺子鸣,等. 10 kV 配电网单相接地故障电弧自熄特性的试验研究[J]. 电网技术,2008,32(8):25-28,34.
YAN Xianglian,CHEN Weijiang,HE Ziming,et al. Experimental research on self-extinction behavior of arc caused by single-phase earth fault in 10 kV distribution network[J]. Power System Technology,2008,32(8):25-28,34.
- [22] 杨明嘉,夏成军,池梓斌,等. 基于参数修正的交叉互联电缆单相故障测距方法[J]. 电力自动化设备,2024,44(8):218-224.
YANG Mingjia,XIA Chengjun,CHI Zibin,et al. Single-phase fault location method for cross-connected cable based on parameter modification[J]. Electric Power Automation Equipment,2024,44(8):218-224.
- [23] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 光伏发电并网逆变器技术要求:GB/T 37408—2019[S]. 北京:中国标准出版社,2019.
- [24] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 光伏电站功率控制系统技术要求:GB/T 40289—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.

作者简介:

翟文辉(1996—),男,中级工程师,研究方向为电力系统运行(E-mail:1245370465@qq.com);

田晓煜(1995—),男,中级工程师,硕士,研究方向为电力系统及其自动化(E-mail:462509302@qq.com);

贾科(1986—),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统保护与控制、新型配电网保护与故障定位(E-mail:ke.jia@ncepu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Adaptive reclosing method based on PV fault transient output control and capacity calculation

ZHAI Wenhui¹,TIAN Xiaoyu¹,KANG Pengpeng¹,CHEN Shuai²,KONG Jiajing²,JIA Ke²

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Company,Urumqi 830018,China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: After the protection trip, the photovoltaic(PV) power sources on other lines may continue to operate with faults, feeding current to the fault point and causing transient faults that cannot extinguish the arc, leading to a failure of the reclosing operation. Therefore, an adaptive reclosing method based on PV fault transient output control and capacity calculation is proposed. The characteristics of fault arc are analyzed and an equivalent method for linearizing arc resistance is proposed. Based on this, the influence of distributed PV capacity on arc characteristics is clarified, and the self-extinguish boundary conditions of arc under the PV transient power output are calculated. By controlling the transient output during PV faults, the problem of reclosing failure caused by transient failure can be avoided. Simulation verification shows that the proposed method can effectively prevent the arc from self-extinguish failing automatically for transient faults of different positions and transition resistances, and improve the power supply reliability of new energy system.

Key words: adaptive reclosing; distributed PV; PV transient output; new energy island system