

DOI:10.12158/j.2096-3203.2023.06.010

一种适用于大型光伏电站的新型备自投方案

蔡乾¹, 于晓军¹, 吴建云¹, 于小艳², 罗美玲¹, 李博通³

1. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750001;
2. 国网宁夏电力有限公司超高压公司, 宁夏 银川 750001;
3. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要:随着大规模光伏接入电网,备用电源自动投入装置(简称“备自投”)的传统投入策略将受到影响:电网出现故障时,由于光伏电源的存在,故障处母线电压无法满足检“无压”判据,传统备自投不能正确动作。为提高新能源利用率并保证在不解列光伏电源的前提下实现备自投正常动作,文中提出一种基于分布式缓冲电阻的新型备自投方案。首先,重点分析光伏出力与负荷功率不匹配程度对并网点电压的影响;其次,在各光伏发电单元直流电容两端并联分布式缓冲电阻支路,利用缓冲电阻平抑主供电源断开后(备自投动作前)形成孤岛状态下的功率不均衡,实现在不解列光伏电源的前提下备自投安全快速动作;最后,针对光伏与负荷功率极不匹配场景,利用 MATLAB/Simulink 进行仿真验证,备用电源投入时冲击电流可限制在 1.5 倍额定电流内,符合相关规范要求,验证了所提新型备自投方案的可行性及有效性。

关键词:光伏电站;分布式电源;备自投;缓冲电阻;功率均衡;冲击电流

中图分类号: TM771

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)06-0091-09

0 引言

近年来全球能源危机问题日益突出,加快推动可再生能源的开发和利用已成为我国亟须解决的重大课题^[1-4]。目前我国提出大力发展新能源发电,其中光伏发电在电力系统中占比逐年提升^[5-8]。为保障电力系统供电可靠性^[9-10],备用电源自动投入装置(简称“备自投”)在电力系统中被广泛应用^[11-14]。但随着大量光伏电源的接入,电力系统结构变得更加复杂^[15-17],电网潮流分布发生改变,传统备自投正确动作将受到影响^[18-20]。

针对新能源大规模接入引起的备自投不正确动作问题,文献[21-23]提出加装低频低压解列装置可靠解列新能源的方案,考虑先解列全部新能源再投入备用电源。该方案虽然能保证备自投正确动作,但会导致新能源利用率严重下降,造成大量负荷损失。此外,新能源具有随机性、间歇性及波动性等特点,新能源机组再次并网难度较大、并网耗时也比较长。

针对上述方案存在的问题,文献[24]提出一种适用于风电场站接入的快速备自投方案,利用母线残压与备用电源电压之间的差拍电压对高频切机、低频减载等方法抑制并网点电压和频率波动,使新能源与所带负荷尽可能形成稳定孤岛,然后考虑投

入备用电源。但随着新能源接入比例的增大,当新能源出力与负荷功率出现较大不平衡时,上述方案可能仍需进行解列新能源操作,且方案存在非同期合闸的风险,即再次并网时会产生较大的冲击电流^[25]。分布式能源大多通过电力电子开关器件构成的逆变器并网,电力电子装置在系统中的占比逐渐增大^[26-27],但各类电力电子装置耐冲击电流的能力弱,因此备投非同期合闸出现的冲击电流不仅会对电网造成很大冲击,而且会对电力电子装置产生较大的影响,与此同时新能源机组使用寿命也会受到影响。

综上所述,在大型光伏电站接入电网系统的背景下,实际工程中一般考虑先解列新能源以确保备自投可靠动作,但如何在不解列新能源的前提下安全可靠地实现备自投是目前研究的难点与挑战。针对上述问题,文中首先对大规模光伏接入场景下传统备自投适应性进行分析,然后重点分析了光伏出力与负荷功率不匹配程度对并网点电压的影响,提出了基于分布式缓冲电阻投入的新型备自投方案。该方案在不解列光伏电源的基础上不仅能解决大规模光伏接入下备自投无法正确动作的问题,而且能够平抑主供电源断开后(备自投动作前)形成孤岛状态下的功率不均衡,能简单有效地限制备自投动作后由于源荷功率不均衡产生的冲击电流,易于工程运用。最后,利用 MATLAB/Simulink 搭建相应系统模型,仿真验证所提方案的有效性。

收稿日期:2023-05-29;修回日期:2023-07-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52177108)

1 大型光伏电站接入对备自投动作的影响分析

1.1 传统备自投工作原理

当进线 1 出现故障引发断路器断开,主供电源缺失时,备自投能实现备用电源的自动投入,因此被广泛应用于电力系统中。为具体阐明备自投的工作原理,以典型的进线备自投为例进行分析,图 1 为该系统的接线示意。图 1 中备自投采用的接线方式为:进线 1 连接主供电源正常向负荷供电,进线 2 作为进线 1 的热备用,即进线 1 上断路器 HBRK1、BRK1,负荷断路器 BRK3、BRK4 以及母联开关均处于合位状态,而进线 2 上断路器 HBRK2、BRK2 处于分位状态。

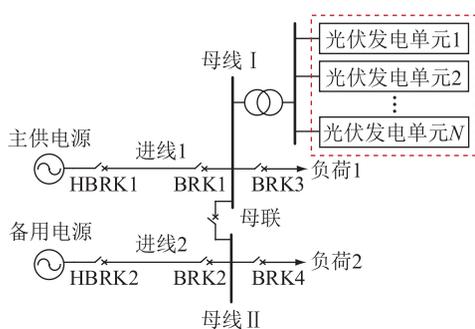


图 1 进线备自投接线示意

Fig.1 Schematic diagram of busbar automatic transfer switch wiring for incoming line

当连接主供电源的进线 1 上发生故障时,进线 1 的断路器 BRK1、HBRK1 跳开使得主供电源缺失。此时进线 1 上无电流,满足传统备自投检“无流”判据;母线 I、II 均失压(此时光伏发电单元未接入),母线电压满足检“无压”判据;若进线 2 满足检“有压”判据(即备用电源可正常供电),则传统备自投会跳断路器 BRK1 确保主供电源断开,同时给断路器 HBRK2、BRK2 发送合闸指令,完成备用电源投入。

1.2 大型光伏电站接入对备自投的影响

大型光伏电站接入电网后,原有系统潮流将发生改变,系统结构复杂,为进一步分析光伏接入对于现有备自投动作逻辑的影响,考虑再次利用图 1 进行说明(此时光伏发电单元投入系统)。

当系统发生进线故障,进线 1 上的断路器断开时,光伏电源会为母线提供电压,导致母线 I、II 上的残压大于备自投“无压”动作条件的整定值,因此传统备自投无法正确动作。

为满足备自投的动作条件,工程上常采用先切新能源再备投的策略:进线 1 上的断路器断开后,保

护装置先将光伏全部解列使得母线 I、II 均失压,待备自投动作条件均满足之后,备自投将备用电源投入。上述方案优先满足备自投动作条件,能保障电力系统的供电可靠性,但存在能源利用率低、负荷损失大、用户利益受损等问题。

为避免光伏电源在故障期间解列运行,目前有方案考虑暂时先不解列光伏电源,而是先判断孤岛系统并网点与主电网之间的电压差与频率差是否满足并网条件,如果满足则考虑快速投入备用电源;如果不满足则考虑利用高频切机、低频减载等方法抑制孤岛内相关电气量的变化,等到满足相应的并网条件之后再投入备用电源。上述方案能在一定程度上减少故障期间光伏电源解列带来的经济损失,但在源荷功率不匹配程度较大的情况下该方案仍须解列部分光伏电源。此外,现有的备自投方案存在非同期合闸的风险,此时投入备用电源将产生较大的冲击电流,严重影响电力系统的安全。综上所述,在大型光伏电站接入的场景中,若系统故障后不解列光伏电源,传统备自投方案会因母线残压提高,无法满足动作条件而拒动,且备用电源投入时还存在非同期合闸的现象,系统面临冲击电流较大的风险。

2 大型光伏电站接入对并网点电压相位的影响分析

若不解列光伏电源,主供电源断开后孤岛系统并网点的电压幅值、相位会迅速发生变化,与备用电源电压之间将存在电压差和相位差。断路器合闸时两侧较大的相位差相比于电压差会给电力系统带来更大的冲击^[28],文中主要关注孤岛系统并网点电压的相位变化。首先分析进线 1 上断路器 BRK1 断开前后很短时间内并网点电压相位突变情况。图 2 为系统等效电路,反映断路器断开前后相关电气量的变化。图 2 中, P_{g0} 为断路器断开前光伏输出有功功率; U_{p0} 、 θ_{p0} 分别为断开前并网点电压幅值和相角; P_{g1} 为断路器断开后光伏输出有功功率; U_{p1} 、 θ_{p1} 分别为断开后并网点电压幅值和相角; U_s 为电网电压幅值,电网电压为参考电压; U_g 、 θ 分别为光伏端口电压幅值和相角; P_r 为负荷消耗的功率; P_s 为电网线路传输功率; X_s 为电网侧等效电抗; X_g 为光伏侧等效电抗; R 为恒功率负荷。

为简化分析,忽略线路电阻的影响,且负荷以恒功率负荷 R 等效(认为负荷已就地无功补偿)。系统正常并网运行时,并网点电压相角 θ_{p0} 以及光伏电压相角 θ 满足:

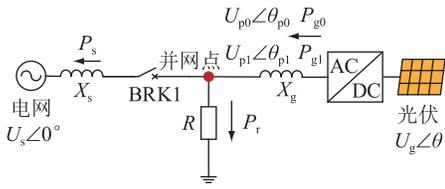


图2 系统等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of system

$$\theta_{p0} = \arcsin\left(\frac{P_s X_s}{U_s U_{p0}}\right) \quad (1)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{P_{g0} X_g}{U_g U_{p0}}\right) + \arcsin\left(\frac{P_s X_s}{U_s U_{p0}}\right) \quad (2)$$

在断路器 BRK1 断开后很短时间内,并网点电压幅值和相角因系统结构改变而迅速发生变化,由 $U_{p0} \angle \theta_{p0}$ 变为 $U_{p1} \angle \theta_{p1}$ 。由于光伏电源输出电压受逆变器控制,且逆变器电压参考值无法发生突变,可认为光伏输出电压在断路器断开很短时间内近似不变,此时并网点电压相位可表示为:

$$\theta_{p1} = \theta - \arcsin\left(\frac{P_{g1} X_g}{U_g U_{p1}}\right) \quad (3)$$

联立式(1)一式(3),可以得到 BRK1 断开前后很短时间内的相位变化 $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = \theta_{p1} - \theta_{p0} = \arcsin\left(\frac{P_{g0} X_g}{U_g U_{p0}}\right) - \arcsin\left(\frac{P_{g1} X_g}{U_g U_{p1}}\right) \quad (4)$$

以宁夏某大型光伏电站作为典例对大型光伏电站接入电网进行分析。该光伏电站实际现场中若发生孤岛,系统出现光伏额定输出功率大于负荷功率(“源大于荷”)场景的概率更大。针对“源大于荷”场景,正常运行时光伏电源将向电网输送功率。当系统孤岛运行时,光伏不再向电网输送功率而只供给负荷所需,因此 $P_{g0} > P_{g1}$,此时孤岛系统内存在的盈余功率将全部由负荷吸收,并网点电压将升高, $U_{p0} < U_{p1}$,因此 $P_{g0} X_g / (U_g U_{p0}) > P_{g1} X_g / (U_g U_{p1})$ 。系统盈余功率越大, P_{g0} 与 P_{g1} 相差越大, U_{p1} 与 U_{p0} 相差越大,根据反正弦函数在区间上的递增特性可知, $\Delta\theta$ 增大。

针对“源小于荷”场景,孤岛系统内光伏输出功率将全部供给负荷所需,但仍存在功率缺额,此时光伏以最大功率输出,输出功率基本不变,并网点电压将下降,即 $U_{p0} > U_{p1}$,因此 $P_{g0} X_g / (U_g U_{p0}) < P_{g1} X_g / (U_g U_{p1})$ 。系统内功率缺额越大, U_{p1} 与 U_{p0} 相差越大, $\Delta\theta$ 绝对值增大。

无论是“源大于荷”还是“源小于荷”场景,光伏与负荷不匹配功率相差越大,并网点电压在孤岛发生前后出现的相位差都越大。

3 基于分布式缓冲电阻的光伏电站备自投方案

根据第2章分析可知,在不解列光伏电源的前提下,光伏与负荷之间功率不匹配,孤岛系统并网点电压相位将迅速变化,且不匹配功率越大,并网点电压相位变化越大,备用电源投入产生的冲击电流越大。为保证备自投安全可靠投入,文中将主要针对“源大于荷”场景,对基于分布式缓冲电阻的新型备自投方案进行介绍。

3.1 分布式缓冲电阻接入拓扑

图3为光伏电站汇集系统示意,光伏电站包含 N 个 1 MW 的光伏发电单元,光伏发电单元通过汇集电缆连接到主变压器上。每个光伏发电单元都内置分布式缓冲电阻,缓冲电阻接入拓扑,如红色虚线框内所示。缓冲电阻与绝缘栅双极晶体管(insulate-gate bipolar transistor, IGBT) 串联后共同并联在直流电容两侧,且缓冲电阻两侧同样并联二极管。IGBT 导通时,直流电容将通过缓冲电阻回路放电来消耗盈余功率;IGBT 关断后,与缓冲电阻并联的二极管将起到续流作用。通过灵活控制投入的缓冲电阻数目,可在备自投动作前对系统不平衡功率进行平抑。

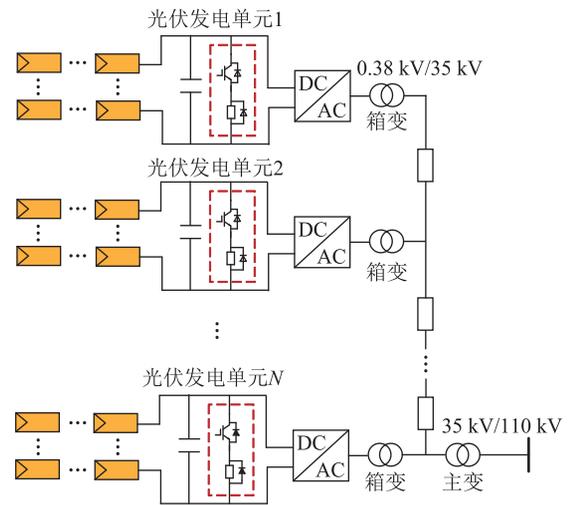


图3 光伏电站汇集系统示意

Fig.3 Schematic diagram of photovoltaic plant collection system

3.2 分布式缓冲电阻投入策略

当光伏带负荷孤岛运行时,光伏发电单元内的缓冲电阻将通过 IGBT 迅速投入,为简化分析,以一个光伏发电单元拓扑为例介绍缓冲电阻投入的控制原理,如图4所示。

光伏发电单元内 IGBT 是否导通主要由直流电容电压越限判据、光伏发电单元电压排序判据以及

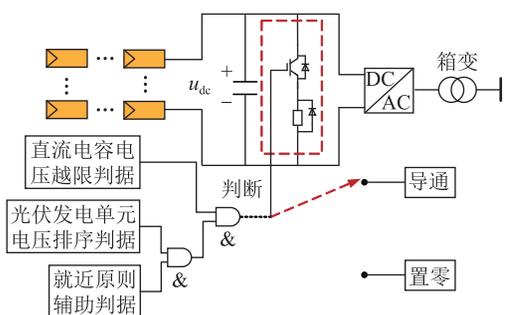


图4 分布式缓冲电阻控制原理

Fig.4 Distributed buffer resistor control principle

就近原则辅助判据共同决定。针对盈余功率导致直流电容电压超过限制值的光伏发电单元, 优先投入直流电容电压更高的光伏单元内的缓冲电阻。若出现直流电容电压值相同无法排序的情况, 进一步利用辅助判据附加判断, 从而充分利用缓冲电阻消耗盈余功率, 抑制电容电压上升。

分布式缓冲电阻投入策略流程如图5所示。策略主要分为两部分:(1) 确定分布式缓冲电阻投入的数量;(2) 确定发送触发脉冲的序列。该策略能够在备自投动作前有效利用分布式缓冲电阻平衡源荷功率, 实现在备用电源投入时抑制冲击电流。

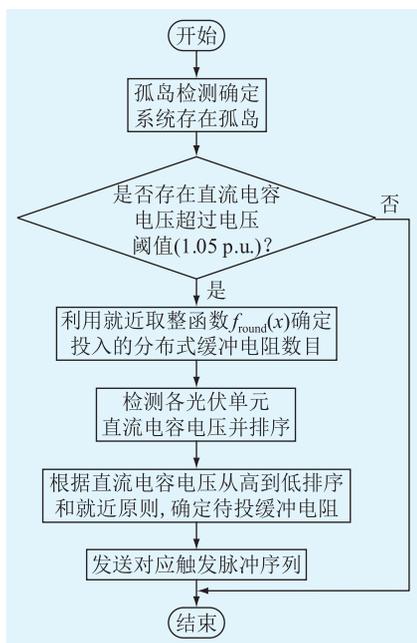


图5 分布式缓冲电阻投入策略流程

Fig.5 Flow chart of distributed buffer resistor input strategy

进线1上断路器断开后, 大容量光伏能提供的功率大于本地负荷所需, 产生的盈余功率将会给直流电容充电, 电容两侧电压上升。当电压超过设定的阈值时, 对应光伏发电单元内的缓冲电阻投入策略启动, 其判据如下:

$$\begin{cases} U_{dc} > U_{dc_lim} & \text{投入策略启动} \\ U_{dc} \leq U_{dc_lim} & \text{投入策略不启动} \end{cases} \quad (5)$$

式中: U_{dc_lim} 为设定的电压阈值, 一般取 1.05 p.u.。针对直流电容电压越限的光伏发电单元, 利用光伏电源与负荷的不平衡功率确定需要投入的缓冲电阻数目, 结合各光伏发电单元直流电容电压的排序, 迅速产生触发脉冲。

通过控制实际投入的分布式缓冲电阻数量 N_1 实现对直流电容电压的实时调节。 N_1 计算如下:

$$N_1 = f_{round} \left(\frac{P_{g0} - P_r}{P_{nom}} N \right) = f_{round} \left(\frac{\Delta P}{P_{nom}} N \right) \quad (6)$$

式中: $f_{round}(\cdot)$ 为就近取整函数; P_{nom} 为光伏电站额定功率; ΔP 为缓冲电阻最佳吸收功率, 结合图1可知, ΔP 可通过测量流经进线1的功率间接得到。

确定 N_1 后, 利用排序模块对各光伏发电单元直流电容电压按由高到低的顺序进行排序, 优先投入直流电容电压较高的 N_1 个光伏单元内的分布式缓冲电阻。此时选定的 N_1 个光伏发电单元内的缓冲电阻支路将导通, 其余单元内缓冲电阻支路上的IGBT仍保持关断。

考虑到大型光伏电站实际运行环境, 实际现场中可能出现两个或多个直流电容电压恰好相同的情况, 若只利用电压排序将无法确定待投入的缓冲电阻。针对该问题, 可增设就近原则判据辅助判断, 即优先投入更靠近并网点的光伏发电单元内的缓冲电阻。该判据的可行之处在于: 实际光伏发电系统中汇集电缆线路上存在能量损耗, 光伏发电单元距离并网点越远, 其电容两侧功率不匹配程度越小, 直流电容电压上升速度越慢, 因此过压风险越低。以图3所示光伏电站汇集系统为例, 整体排序原则如式(7)所示。

$$\begin{cases} U_i < U_j & \text{缓冲电阻 } j \text{ 先投入} \\ U_i = U_j & \begin{cases} i > j, \text{缓冲电阻 } i \text{ 先投入;} \\ i < j, \text{缓冲电阻 } j \text{ 先投入} \end{cases} \\ U_i > U_j & \text{缓冲电阻 } i \text{ 先投入} \end{cases} \quad (7)$$

综上所述, 分布式缓冲电阻投入策略首先检测光伏发电单元直流电容电压判断越限条件是否满足, 进而针对满足电压越限的光伏发电单元利用排序模块确定具体投入顺序, 接着考虑了实际工程中可能出现的无法确定直流电容电压顺序的特殊情况, 额外设置就近原则辅助判据, 最终保证触发脉冲序列的可靠生成。

3.3 分布式缓冲电阻阻值设计

分布式缓冲电阻的阻值应保证在最恶劣情况下电力系统的安全。当光伏电站内的光伏发电单

元功率满发(总额定功率为 P_{nom}),且负荷功率为0时,产生的最大盈余功率需要依靠 N 个缓冲电阻来消耗,因此缓冲电阻阻值为:

$$R' = \frac{U_{dmax}^2 N}{P_{nom}} \quad (8)$$

式中: U_{dmax} 为光伏直流电容电压最大值,由于电力电子装置对电压的耐受能力较低,一般取1.1倍额定值。

3.4 新型备自投方案动作逻辑

基于分布式缓冲电阻备自投方案的动作逻辑具体如图6所示。针对1.2节所指出的在光伏接入条件下传统备自投动作条件不满足的问题,文中提出新的备自投动作判据。

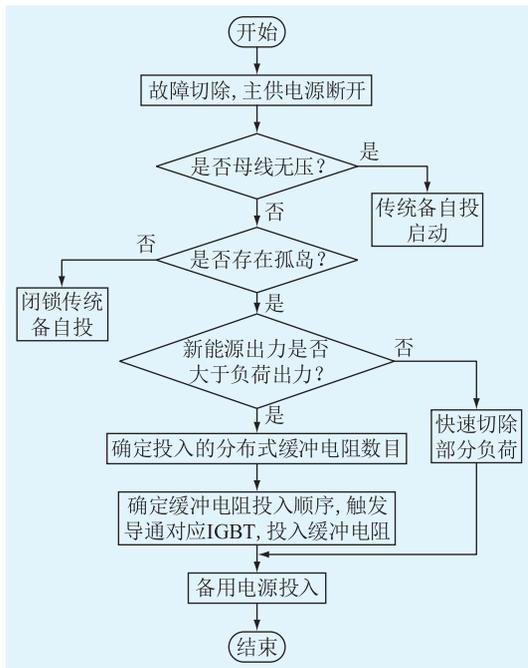


图6 新型备自投方案流程

Fig.6 Flow chart of new busbar automatic transfer switch method

新型备自投方案具体思路为:当主供电电源因进线1故障断开而失电后,新型备自投方案首先判断并网点母线电压是否失压,若满足备自投检“无压”判据,传统备自投将启动,若不满足则考虑利用基于工频突变量阻抗测量^[29]的孤岛检测法来判断系统是否出现孤岛。孤岛检测法的基本原理为:正常并网运行时,并网点等值阻抗为大电网与新能源系统并联阻抗,此时测得的并联等值阻抗较小;发生孤岛后,并网点等值阻抗变为新能源系统阻抗,相比并网运行时的等值阻抗迅速变大,通过检测孤岛发生前后并网点等值阻抗能够快速准确地检测出孤岛。且该孤岛检测方案能较好地与后续的备投方案相互协调配合。

检测到系统中存在孤岛后,针对“源大于荷”场景,根据3.2节中所提策略确定投入缓冲电阻数目及对应触发序列,实现盈余功率的快速耗散。为避免缓冲电阻长时间投入造成过热损坏,考虑在备用电源投入后迅速退出缓冲电阻,此时由于存在大电网的电压钳位作用,缓冲电阻退出不会使系统产生较大的波动和冲击。针对“源小于荷”场景,利用快速切负荷的方式即能实现系统内功率均衡,由于快速切负荷方案较为成熟,文中不再赘述。若利用孤岛检测技术未在系统中检测出孤岛,则立即闭锁备自投,避免备自投误动。

针对利用分布式缓冲电阻耗散盈余功率的方案,技术上现已比较成熟,已有相关文献在柔性直流并网系统场景下采用类似的直流耗能装置限制因功率盈余而造成的电压升高^[30-32]。文献[30]考虑将缓冲电阻分散置入,从而不必单独增加卸荷装置,能大幅降低占地面积、减少投入成本。此外,通过采集本地信息即可对各光伏发电单元进行实时监测及控制,且文中采取的控制方案简单灵活,能够进一步保证光伏发电单元不会出现过压问题,提高系统的安全可靠性。

4 仿真实验

为验证文中方案的有效性,参考宁夏某大型光伏电站实际参数,在MATLAB/Simulink中搭建仿真模型,具体结构如图3所示。该大型光伏电站总容量为50 MW,各光伏发电单元参数以及系统参数如表1所示。

表1 光伏发电单元及系统参数

Table 1 Parameters of photovoltaic power generation unit and system

参数	数值
光伏发电单元额定容量/MW	1
光伏阵列温度/°C	25
光伏阵列接收辐射强度/(W·m ⁻²)	1 000
DC/AC 逆变器容量/MW	1
箱变电压变比	0.38 kV/35 kV
主变电压变比	35 kV/110 kV
直流电容额定电压/V	650
频率/Hz	50
分布式缓冲电阻阻值/Ω	0.51

该大型光伏电站正常运行时光伏电源将向电网输送功率,因此主要对“源大于荷”场景进行仿真。为验证文中所提备自投方案的有效性,考虑对功率极不匹配场景进行仿真分析。光伏输出总额定功率为50 MW,所带负荷为1 MW,0.7 s时进线1

上断路器断开,该场景下利用工频突变量阻抗作为判据能极快检测出孤岛,因此控制缓冲电阻投入的IGBT导通时间极短。考虑到各信号的传递时间以及快速断路器合闸时间^[24],考虑延时60 ms后快速备自投合闸。进线1上断路器断开后(备用电源投入前),光伏单元内分布式缓冲电阻将依据3.2节提出的投入策略有序投入,阻值设置根据式(8)计算得到,在仿真中取缓冲电阻阻值为0.51 Ω,确保在源荷极不匹配场景下光伏单元直流电容电压不超限。

不投入缓冲电阻备自投时的实验仿真结果如图7所示。

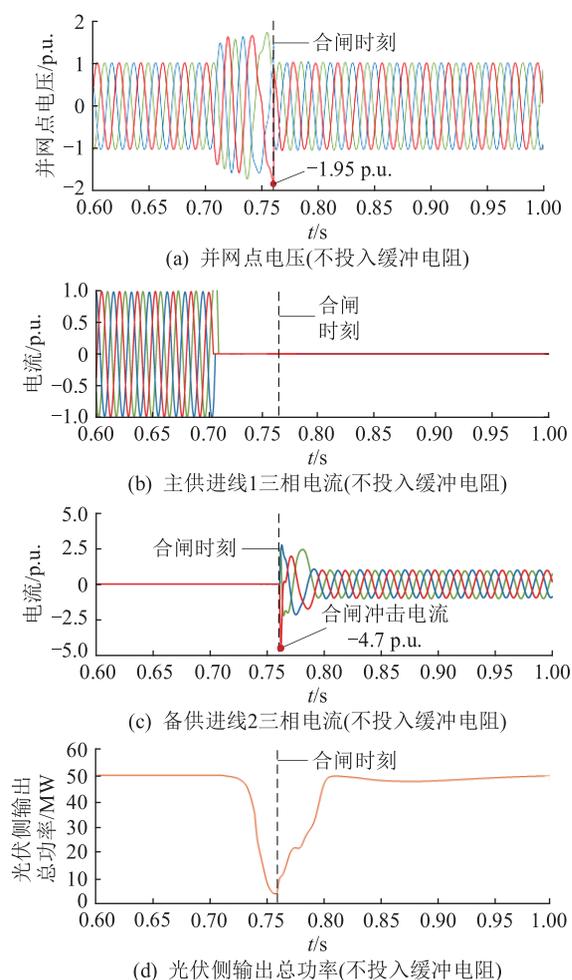


图7 不投入缓冲电阻备自投实验仿真结果

Fig.7 Simulation results of busbar automatic transfer switch experiment without inputting buffer resistance

图7(a)为并网点三相电压波形,进线1断路器在0.7 s断开,孤岛系统存在功率盈余,并网点电压迅速上升;图7(b)为进线1上的三相电流;图7(c)为进线2上的三相电流,可看出备自投合闸时达到的冲击电流为额定电流的4.7倍;图7(d)为光伏交流侧输出总功率波形,系统出现孤岛后光伏输出功率将迅速下降并接近于负荷功率,光伏输出功率将

出现较大波动。

投入缓冲电阻备自投时的实验仿真结果如图8所示。

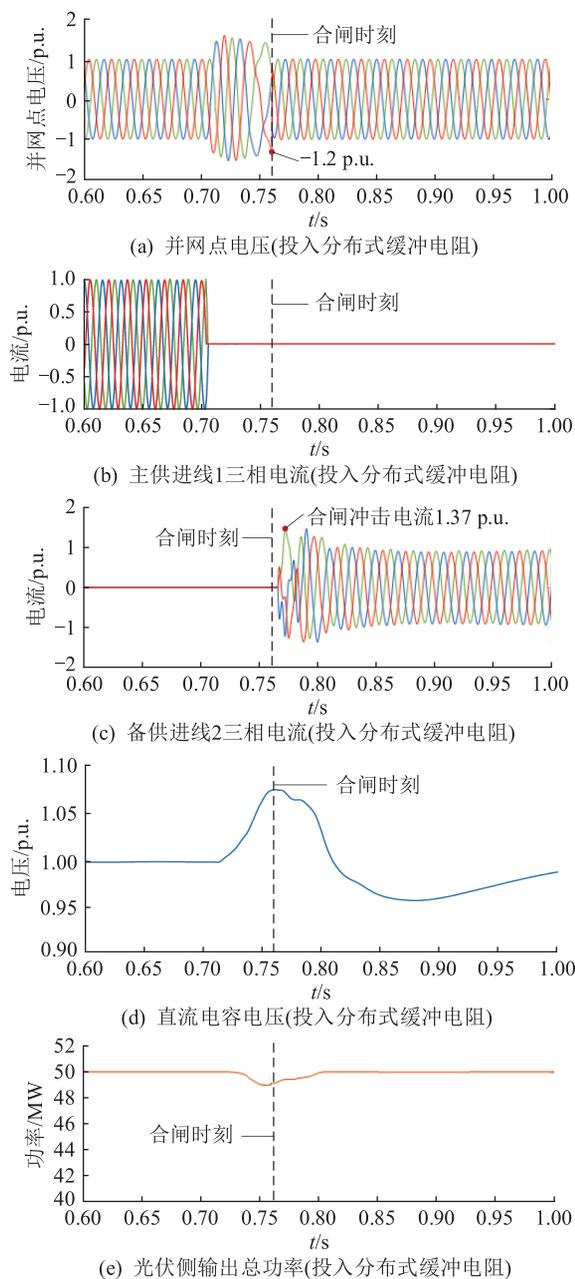


图8 投入缓冲电阻备自投实验仿真结果

Fig.8 Simulation results of busbar automatic transfer switch experiment with inputting buffer resistance

对比图8(a)与图7(a)可看出,分布式缓冲电阻投入后,并网点电压能得到明显限制;由图8(b)、(c)可看出,进线1上断路器在0.7 s断开,经60 ms备自投时延后进线2上断路器合闸,且合闸电流被限制为1.37倍额定电流,满足分布式电源接入相关规范中规定的过电流不大于额定电流1.5倍的要求^[33]。由图8(d)可看出,投入缓冲电阻后直流电容电压上升趋势减缓且限制在1.1倍的额定电压范围内;由图8(e)可看出,投入缓冲电阻后光伏输出

功率波动较小,在保证光伏利用率的同时也限制了备自投冲击电流,仿真结果达到方案预期效果。

5 结论

文中针对光伏接入下传统备自投动作条件无法满足的问题,通过分析进线1断路器断开前后并网电压相位的变化规律,提出一种适用于大型光伏电站的新型备自投方案,主要结论如下:

(1) 根据主供进线断路器断开前后并网点电压相位变化可得,光伏与负荷功率不匹配程度越大,并网点电压相角变化越大,备用电源投入时产生的冲击电流越大。

(2) 利用缓冲电阻平抑主供电源断开后(备自投动作前)形成孤岛状态下的功率不均衡,能简单地抑制由于系统功率盈余产生的冲击电流,易于工程运用。

(3) 新型备自投方案能在不解列新能源的前提下实现备自投,提高了新能源利用率及长期经济性。此外,方案考虑将缓冲电阻分散置入光伏发电单元内,无须单独增加卸荷装置,能够大幅降低占地面积、减少投入成本。

致谢

本文得到国网宁夏电力有限公司科技项目“不解列新能源的终端场站快速备自投技术研究”(5229NX220003)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 刘永奇,陈龙翔,韩小琪. 能源转型下我国新能源替代的关键问题分析[J]. 中国电机工程学报,2022,42(2):515-524.
LIU Yongqi, CHEN Longxiang, HAN Xiaoqi. The key problem analysis on the alternative new energy under the energy transition[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(2):515-524.
- [2] 李晖,刘栋,姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报,2021,41(18):6245-6259.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(18):6245-6259.
- [3] 王守相,赵倩宇. 新型电力系统下提升可再生能源接纳能力[J]. 供用电,2022,39(5):2,1.
WANG Shouxiang, ZHAO Qianyu. Improving the acceptability of renewable energy under the new power system[J]. Distribution & Utilization,2022,39(5):2,1.
- [4] 吴晓刚,唐家俊,吴新华,等. “双碳”目标下虚拟电厂关键技术建设与现状[J]. 浙江电力,2022,41(10):64-71.
WU Xiaogang, TANG Jiajun, WU Xinhua, et al. Key technologies and present situation of virtual power plant under "dual-carbon" goals [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(10):

- 64-71.
- [5] 张笑弟,高强,潘弘. “双碳”目标下新型配电系统功能形态及规划体系[J]. 电力系统及其自动化学报,2022,34(5):96-101.
ZHANG Xiaodi, GAO Qiang, PAN Hong. Function, form and planning system of novel power distribution system with "double-carbon" goal [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(5):96-101.
- [6] 任冲,柯贤波,王吉利,等. 高比例新能源电网新能源功率优化分配方法[J]. 电力工程技术,2022,41(3):110-117.
REN Chong, KE Xianbo, WANG Jili, et al. New energy power optimal distribution method for high proportion new energy power grid [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3):110-117.
- [7] 张金平,汪宁渤,黄蓉,等. 高渗透率光伏参与电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(15):179-186.
ZHANG Jinping, WANG Ningbo, HUANG Rong, et al. Survey on frequency regulation technology of power grid by high-penetration photovoltaic [J]. Power System Protection and Control, 2019,47(15):179-186.
- [8] 万灿. 高比例可再生能源电力系统分析与调控[J]. 电力工程技术,2021,40(2):1.
WAN Can. Analysis and regulation of high proportion renewable energy power system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021,40(2):1.
- [9] 李琳,冀鲁豫,张一驰,等. 巴基斯坦“1·9”大停电事故初步分析及启示[J]. 电网技术,2022,46(2):655-663.
LI Lin, JI Luyu, ZHANG Yichi, et al. Preliminary analysis and lessons of blackout in Pakistan power grid on January 9, 2021 [J]. Power System Technology, 2022,46(2):655-663.
- [10] 吴界辰,汪莹,易海琼,等. 中国台湾“3·3”大规模停电事故分析及对未来电网发展的启示[J]. 电力建设,2022,43(7):73-79.
WU Jiechen, WANG Ying, YI Haiqiong, et al. Analysis of the power outage in Taiwan, China on March 3, 2022 and its implications for future power grid development [J]. Electric Power Construction, 2022,43(7):73-79.
- [11] 金公羽. 广域备自投原理及其动作策略研究[D]. 杭州:浙江大学,2021.
JIN Gongyu. Research on wide-area backup auto-switching technology and its transfer strategy [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [12] 陈晓龙. 适应分布式电源接入的配电网保护与控制技术研究[D]. 天津:天津大学,2015.
CHEN Xiaolong. Research on protection and control technology for distribution network with the distributed generation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [13] 沈政,金震. 大型数据中心备自投装置的设计[J]. 浙江电力,2022,41(11):39-45.
SHEN Zheng, JIN Zhen. Design of the BATS for a large data center [J]. Zhejiang Electric Power, 2022,41(11):39-45.
- [14] 李世群,徐峰,袁森,等. 柔性直流换流站备自投误动分析

- 及优化[J]. 供用电, 2021, 38(9): 89-95.
- LI Shiqun, XU Feng, YUAN Miao, et al. Analysis and optimization of standby automatic switching maloperation in flexible DC converter station[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(9): 89-95.
- [15] 彭生江, 陆军, 张中丹, 等. 光伏接入对电网的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 157-164.
- PENG Shengjiang, LU Jun, ZHANG Zhongdan, et al. Research on the influence of photovoltaic access on a power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 157-164.
- [16] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
- DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [17] 卓振宇, 张宇, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
- ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [18] 郑涛, 王洪炳, 于晓军, 等. 适应于新能源接入的新型备自投方案[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4296-4304.
- ZHENG Tao, WANG Hongbing, YU Xiaojun, et al. New busbar automatic transfer switch scheme for new energy access[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4296-4304.
- [19] 李乃永, 林霞, 李磊, 等. 考虑分布式电源特性的配电网保护与安全自动装置配合方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 85-89.
- LI Naiyong, LIN Xia, LI Lei, et al. Coordinated scheme of distribution network protection and automatic devices considering DG characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 85-89.
- [20] 许航. 含 DG 的变电站备用电源投切控制的相关问题的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- XU Hang. Research on the problem relating to automatic bus transfer of substation with DG connected[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.
- [21] 冀婉舒. 考虑分布式电源接入的链式网络区域备自投控制方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- JI Wanshu. Research on regional automatic bus transfer control method for regional power grid considering distributed power[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [22] 陈小龙. 110 kV 变电站远方备自投的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- CHEN Xiaolong. Research on the application of the 110 kV substation remote backup[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [23] 陈志峰, 沈娜, 王珩, 等. 高渗透率水电接入的变电站备自投逻辑优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 157-164.
- CHEN Zhifeng, SHEN Na, WANG Gan, et al. Logic optimization of a transformer substation busbar automatic transfer switch with high penetration of hydropower[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 157-164.
- [24] 姜惠兰, 薛静玮, 李天鹏, 等. 含风电场电网的备用电源快速投切方式及其整定方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2768-2774.
- JIANG Huilan, XUE Jingwei, LI Tianpeng, et al. Fast transfer mode and its tuning method for emergency power supply of grid connected with wind turbine[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2768-2774.
- [25] 毛宇晗. 多电压等级配电网备用电源自动投入装置配置及投入策略优化方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- MAO Yuhan. Research on optimization method of configuration and control strategy for busbar automatic transfer switch in multi-voltage level distribution network[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [26] 肖文浩, 彭卉, 刘兴栋, 等. 一种基于柔性装置的配电网网架结构设计与研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(5): 109-117.
- XIAO Wenhao, PENG Hui, LIU Xingdong, et al. Design and research of distribution network structure based on flexible device[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(5): 109-117.
- [27] 牟杰, 杨依睿, 徐永海, 等. 接入电力电子变压器的光伏及混合储能协调控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(3): 143-152.
- MU Jie, YANG Yirui, XU Yonghai, et al. Research on coordinated control strategy of photovoltaic and hybrid energy storage system connected to power electronic transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(3): 143-152.
- [28] 陈志峰, 吴勇, 金滇黔. 考虑山区小水电的智能型备自投装置的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 120-122, 127.
- CHEN Zhifeng, WU Yong, JIN Dianqian. Research on intelligent automatic bus transfer equipment suitable for the small hydroelectric power system in mountainous area[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 120-122, 127.
- [29] 郑涛, 王燕萍, 袁飞, 等. 基于工频突变量阻抗测量的新型孤岛检测方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 8-13.
- ZHENG Tao, WANG Yanping, YUAN Fei, et al. Islanding detection based on power-frequency variation impedance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 8-13.
- [30] 杨仁焯, 王霄鹤, 陈晴, 等. 机组协同-分布卸荷的风电场-柔直并网系统故障穿越方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 103-111.
- YANG Renxin, WANG Xiaohe, CHEN Qing, et al. Fault ride-through method of flexible HVDC transmission system for wind farm integration based on coordination of wind turbines and distributed braking resistors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 103-111.

- [31] CAO S, XIANG W, LU X J, et al. Energy dissipation of MMC-HVDC based onshore wind power integration system with FB-DBS and DCCB [J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(2): 222-230.
- [32] 许彬, 高冲, 张静. 应用于海上风电接入的 VSC-HVDC 系统主网侧交流故障穿越的新型直流耗能装置拓扑 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 88-97, 400.
XU Bin, GAO Chong, ZHANG Jing. A novel DC chopper topology for grid side fault ride through in VSC-HVDC based offshore wind power connection [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 88-97, 400.
- [33] 国家电网有限公司. 分布式电源接入配电网设计规范: Q/GDW 11147—2017[S]. 2018.

State Grid Corporation of China. Design specification for distributed power access to distribution network; Q/GDW 11147-2017[S]. 2018.

作者简介:



蔡乾

蔡乾(1973),男,学士,高级工程师,从事电力系统继电保护、新能源并网技术研究工作 (E-mail: dkzxbhc@163.com);

于晓军(1984),男,硕士,高级工程师,从事交直流系统控制保护维护管理相关工作;

吴建云(1986),男,硕士,高级工程师,从事电网继电保护相关工作。

A new backup automatic switch scheme for large-scale photovoltaic power stations

CAI Qian¹, YU Xiaojun¹, WU Jianyun¹, YU Xiaoyan², LUO Meiling¹, LI Botong³

(1. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China;

2. Ultra-high Voltage Company of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China;

3. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: With the integration of large-scale photovoltaic power stations into power grids, the traditional strategy of the backup automatic switch is affected. When a grid fault occurs, due to the existence of photovoltaic power sources, the busbar voltage at the fault point cannot meet the 'no voltage' criterion, and the traditional strategy cannot operate correctly. In order to improve new energy utilization and ensure normal input of the backup power supply without disconnecting photovoltaic power sources, a new backup automatic switch scheme based on distributed buffer resistors is proposed. Firstly, the influence of the mismatch between photovoltaic output and load power on the grid-connected point voltage is analyzed. Secondly, distributed buffer resistor branches are connected in parallel at both ends of the DC capacitor in each photovoltaic power generation unit, using buffer resistors to suppress the power imbalance formed in the islanded state after the main power supply is disconnected (before the backup automatic switch operates), realizing safe and fast operation of the backup automatic switch. Finally, MATLAB/Simulink is used to simulate and verify the scenario of extreme mismatch between photovoltaic and load power, and the inrush current can be limited to 1.5 times rated current, which meets the relevant specifications and verifies the feasibility and effectiveness of the proposed new backup automatic switch scheme.

Keywords: photovoltaic power stations; distributed resource; backup automatic switch; snubber resistance; power balance; impulse current

(编辑 方晶)