

0.4 kV低压配电网不停电作业中支路柔性线路保护接地方法

文/张刚¹ 彭思尧²

1. 国网湖北省电力有限公司潜江市供电公司; 2. 华北理工大学电气工程学院

提出0.4 kV低压配电网不停电作业中支路柔性线路保护接地方法研究。首先分析0.4 kV电压下的配电网支路的等级结构, 设置400 V为电压等级, 然后架构配电网电压平衡器以实现配电网线路支路的控制, 进而基于瞬时功率特性设置线路接地保护, 分析故障点, 最后在电压互感器的参数收集中, 实现接地方法的研究。

在配电网出现故障问题时, 高压配电网一般以故障区域内的断电操作来进行维修, 这种做法出于维修人员的安全考虑。而低压配电网中出现支路的故障问题时, 一般选择通过变压器对线路电压进行调整, 在不停电的状态下进行作业, 但是为了整体线路的正常运行, 在低压配电网的支路中设置柔性线路的接地保护。在接地保护的研究中, 高正创等人^[1]基于电压行波陡度的柔性直流送出线路设计了接地的快速保护方案, 实现了故障问题的快速定位; 戴志辉团队^[2]基于反射系数和模型匹配的方法, 对柔性直流电网中的单端量线路进行保护, 在保护方法方面实现了新技术的突破; 张韵琦等人^[3]基于双端初始电流行波时频矩阵相似度分析了柔性直流输电线路的保护原理。上述的研究中, 都以配电网的线路保护为出发点, 分别设计研究了保护方法, 本文的研究重点为低压配电网中不停电作业的支路柔性线路的接地方法。

低压配电网支路柔性线路保护接地方法研究

1. 分析低压配电网支路等级结构

0.4 kV的低压配电网一般划分在公共区域中, 而公共区域配电网中的电压等级的划分需要基于多种影响因素。

首先是对现有负荷的满足, 进而是对各种新型电气元件的适配, 最后是在新型能源的应用下, 对分布式能源的接入。所以, 本文对低压配电网等级的考虑遵循以下几个原则:

- 1) 在低压配电网的电压层级选择中, 以最简化的网络结构来减少变压层次。
- 2) 作为低压配电网的不停电作业, 需要考虑其中直流与交流的衔接序列。
- 3) 在电压等级的判定中, 根据所适配的供电设备, 确定相应的电压等级。

本文基于不停电作业的原则考虑, 以400 V的配电网电压等级为后续的计算标准值^[4]。

在低电压的支路柔性线路的保护接地方法的选择中, 需要首先对低压配电网的网架结构进行分析。配电网的基本拓扑结构分为三种, 分别为环状结构、辐射状结构以及双端供电结构。本文选择环状结构作为低压配电网拓扑结构的应用。环状结构的示意图如图1所示。

目前对于网架选型并没有系统的评估方法, 因此本文基于环状结构的优势性, 根据其在任意线路发生故障, 其他线路可以启动故障切除的保护装置这一优点, 实现不停电作业的支路柔性线路保护接地方法。

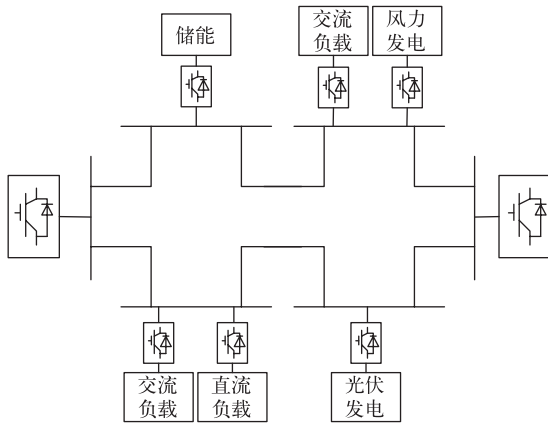


图1 环状低压配电网结构示意图

2. 架构配电网电压平衡器

在0.4 kV的低压配电网不停电作业时，正负电极会产生一定的电压偏差，造成电压不稳定的问题，以至于影响配电网的供电质量。为了保证不停电作业中的配电网的正常运行，本文的研究选择在配电网中加装电压平衡器解决上述问题。

本文所构建的电压平衡器的主要部件为电容和电感装置，以及二极管。所需要的器件较少，因此成本也比较低，适合所需要研究的低压配电网的正负极平衡场景。

电压平衡器中通过全控型电力电子器件对上下桥臂的控制，将电阻接入正负极间的线路，通过电压平衡器在整体拓扑结构中起到的电能平衡作用，不仅吸收高电压处的回流电路，也能够为低压回路供电，为配电网的供电输出提供保障^[5]。

将上述对电压平衡器的构想，以建模的形式进行表达，那么电压平衡器中正级电容电压的状态变量为

$$X(t) = \begin{bmatrix} i_L(t) \\ u_p(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， u_p 为正级电容电压； i_L 为平衡电感电流。

然后根据电网平衡器中的导通流线来对状态方程进行表达，设置对应的开关管的工作周期假设管1导通，二极管2截止，那么可以获得电压平衡器的状态变量，并根据开关周期中的平均值，获取电路的静态工作点，进而通过对静态工作点施加扰动，得到电压平衡器的信号模型相应的传递函数为

$$\frac{u_p(s)}{u_m(s)} = \frac{\frac{L}{R^2}s + (1-D)(1-2D)}{L(C)s^2 + (2D-1)^2} \quad (2)$$

式中， u_{in} 为输入电压； R 为电阻值； D 为开关的占空比； C 为电流回路中的电感。

根据正负极电容电压与电压等级计算标准值之间的差值，通过环状配电网结构畸形调制波的分析，能够与载波信号形成触发信号，从而实现对电网线路支路的控制^[6]。

3. 基于瞬时功率特性设置线路接地保护

在整体的支路柔性线路的保护接地中，为了在配电网发生故障后不停电对故障进行维检，本文基于瞬时功率特性分析保护措施。

采用电流梯度算法作为保护启动判据，当有一个电流梯度值满足阈值时则启动保护，表达式为

$$\begin{cases} \nabla i(k) = \sum_{j=0}^2 i(k-j) - \sum_{j=3}^5 i(k-j) \\ |\nabla i(k)| > \Delta \end{cases} \quad (3)$$

式中， $\nabla i(k)$ 表示当前时刻电流梯度值； $i(k-j)$ 表示在时刻 k 的前 j 个周期时的瞬时电流值； Δ 表示判据启动阈值，根据正常运行时电流梯度的最大实际值进行设定。

然后对配电网内的故障进行识别判定，在配电网进行接地保护时，对应的线路存在一定的故障问题。因此当故障发生时，线路两端的母线电压随之下降。根据电流和电压的下降问题，可以对配电网区内外的保护进行判别，并且通过左右母线的瞬时功率的差值，设置阈值为0。因此，当线路中的瞬时功率差值小于阈值时，就能够判定配电网的故障发生在配电网区内还是区外^[7]。

而根据本文上述所提出的保护流程，则是由保护启动和故障判别两个方面组成。首先采集线路保护安装处上的电流以及电压数据，判断数据是否满足启动阈值，并根据线路中的电压平衡器，计算电流电压值，判断计算结果与阈值是否符合，进而分析故障区域。若为区内故障，则比较相邻两条支路中的线路的瞬时功率，若线路中的瞬时功率小于设定功率，那么该处为故障点。

4. 选择低压电流互感器型号

为了实现上述流程中的瞬时功率的计算，本文选择低压互感器负责电路中电流、电压参数的采集。互感器的参数比较见表1。

通过表1的对比，基于造价和延时性以及传感准确度的考虑，选择综合性的巨磁电阻效应电流互感

器，在低压配电网中，该互感器的测量准确度可以达到0.2%以上，并且可以准确测量故障电流大小，满足本文对支路容性线路保护接地测量所需。

表1 电流互感器的参数比较

参数	全光纤	电阻分压器	巨磁电阻效应	零磁通型
测量准确度 (%)	0.2	<0.2~<1.5	<0.2~<1.5	1
最大不饱和电流/p.u	30	6	6	1.5
造价	高	中等	中等	低
延时/μs	10	40040040	50	1
低压产品化	无	有	有	有
大电流冲击	允许	允许	允许	5倍冲击

5. 实现不停电作业中的线路保护

在对0.4 kV低压配电网不停电作业，支路柔性线路保护接地方法进行研究的过程中，本文首先通过对低压配电网支路的等级结构进行划分。然后架构相应的电压平衡器，进而通过瞬时功率的特性设置保护措施。在保护方法中，通过电流梯度算法，进行启动验证。满足启动条件后，配电网拓扑结构将启动命令进行传输，进行故障的识别。

在线路保护启动后，对保护区域的两端进行电流和电压的检测，根据所采集的瞬时功率值，进行故障的判别。当满足判据后，才能将计算区域设定为故障区段，以增大保护的可靠性^[8]。

当上述检测出对应故障区段后，应对故障进行快速隔离。若在上述区段内外故障判定中检测为区外故障，保护恢复到初始状态。在上述的整体流程中，完成对低压配电网在不停电作业时，其中的支路柔性线路保护接地方法的研究。

实验论证

1. 实验说明

在对本文所研究的线路保护接地方法的研究中，以两种故障方式，三处故障区域为实验的对比变量。通过仿真配电网环境的构建，实现本文研究的接地保护方法与其他方法的对比。为了实验中记录数据的简明性，本文设置 0.4 kV低压配电网不停电作业中支路柔性线路保护接地方法为实验组，设置传统的接地保护方法为对照组。将两组方法进行对比，验证本文方法的优势之处。

2. 实验准备

在本次实验中对所设计的保护接地方法进行验

证，在仿真实验环境中构建等效低压配电网模型，所设计的仿真参数见表2。

表2 实验仿真参数

参数	数值	参数	数值
系统额定电压/V	400	平衡器电感/H	0.1
额定容量/kW	200	平衡器电容/mF	20
线路电阻/(Ω/km)	0.15	开关频率/kHz	10
接入负荷电阻/Ω	15~20	线路电感/(mH/km)	0.5

配电网也会受到噪声的干扰，因此实际的配电网信号中，通过信噪比来表示，计算方法为

$$SNR=101\frac{P_s}{P_{noise}}(dB)$$
 (4)

式（4）中， P_s 和 P_{noise} 分别表示正常信号与噪声信号，并且噪声信号会随着信噪比的增大而减弱。

本次的保护接地方法采用瞬时功率的方法，可以有效消除噪声的影响，在噪声影响下的方法效果如图2所示。

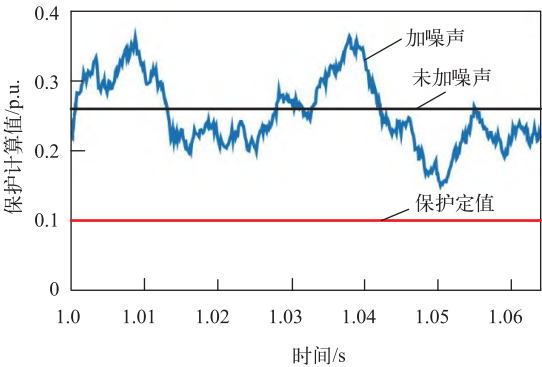


图2 噪声对本文所用方法的影响

由图2可以看出，本文所用的方法，在配电网的噪声影响下，也能够保证可靠动作，该方法具备一定的抗噪声能力。并且在实际的故障发生中，故障电流会受到回路中电阻的影响，通过对不同过渡电阻的分析，得出故障区段不受过渡电阻的影响，所以仿真实验中可以忽略故障中的电阻问题。

3. 实验结果

为了验证本文所研究的接地保护方法的有效性，在仿真的配电网环境中设置不同的故障区域，分别为区域1、区域2和区域3。并在三个故障区域内设置两种故障：一为单极接地故障；二为双极短路故障。将两种接地保护方法代入其中，获得对应的相关系数。

表3 两种接地方法故障区段保护参数

过渡电阻	r_1	r_2	r_3	故障区段
实验组单极故障	-0.263 9	0.427 3	0.918 2	区域1
	0.990 7	-0.341 1	0.649 2	区域2
	0.991 4	0.990 7	-0.310 6	区域3
实验组双极故障	-0.262 7	0.383 7	0.965 3	区域1
	0.490 7	-0.385 5	0.695 2	区域2
	0.987 7	0.986 3	-0.327 2	区域3
对照组单极故障	0.160 6	0.289 8	0.964 0	区域1
	0.983 5	-0.385 5	0.629 9	区域2
	0.987 6	1.051 2	0.331 9	区域3
对照组双极故障	0.749 3	0.633 1	-0.469 7	区域1
	0.303 3	0.772 6	0.222 6	区域2
	-0.640 9	0.625 4	0.849 0	区域3

根据表3中的数据分析可以得出，实验组的故障区段的两端电流间的相关系数小于0，处于负相关的状态，所以能够符合故障区段的定位需求，而且三个区域以及两种故障方式中都能够体现其接地方法的保护性。而对照组的接地方法，在某些区域位置中不能体现负相关的故障定位需求，所以该方法在不同故障位置和故障类型中的保护能力有待提高。因此，通过实验组接地保护方法和对照组接地保护方法的对比，能够体现出本文所设计的线路保护接地方法的有效性和可靠性。

结束语

本文对低压配电网在不停电作业中支护柔性线路保护的接地方法进行了研究，首先对配电网的电压进行分级以及结构的选择，在环形结构的作用下架构配电网电压平衡器，然后基于瞬时功率特性设置线路接地保护方法，进而选择低压电流互感器型号对数据进行采集，实现配电网中不停电作业中的线路保护。最后在实验的辅助下，验证了本文方法

的有效性。**EA**

(收稿日期：2023-08-29)

参考文献

[1] 高正创, 李凤婷, 解超, 等. 基于电压行波陡度的柔性直流送出线路快速保护方案[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 84-93.

[2] 戴志辉, 秦昊宇, 李杭泽, 等. 基于反射系数和模型匹配的柔性直流电网单端量线路保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(11): 101-109.

[3] 张韵琦, 王聪博, 余越, 等. 基于双端初始电流行波时频矩阵相似度的柔性直流输电线路保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2024(7): 1-13.

[4] 李海锋, 蒋慧敏, 梁远升, 等. 基于故障电压反行波拟合残差的柔性直流线路单端行波保护[J]. 电网技术, 2023(12): 1-10.

[5] 雷顺广, 束洪春, 李志民. 基于桥臂功率特征的全-半混合型柔性直流输电线路保护[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3563-3575.

[6] 李振兴, 崔晓琳, 徐浩, 等. 基于双端电流杰卡德相似度比较的柔性直流输电线路保护[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(5): 37-47.

[7] 钟启迪, 蒲莹, 孙建锋, 等. 适用于柔性直流电网的500 kV级直流电缆与架空线路并联运行控制及保护策略[J]. 电力建设, 2022, 43(7): 80-86.

[8] 汪光远, 马啸, 林湘宁, 等. 基于集成学习的柔性直流配电线路单端量高灵敏保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8447-8463.

