

DOI: 10.7667/PSPC171024

不同接地方式电缆型配电网单相接地故障下的可靠性评估

徐玉琴, 杨浩, 李鹏

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 为了对不同接地方式下电缆型配电网的可靠性进行评估, 对消弧线圈接地方式和小电阻接地方式下线路发生单相接地故障时线路的跳闸率模型进行了分析, 结合两种接地方式的特点分析了故障隔离和负荷转移对负荷点可靠性的影响。利用基于故障模式影响分析的最小路法分别建立了两种接地方式下负荷点的长时和短时可靠性指标计算模型。最后, 对广东某市电缆型配电网的供电可靠性进行了评估。结果表明: 消弧线圈接地方式比小电阻接地方式有更高的可靠性, 但随着各馈线之间的联络越来越紧密消弧线圈接地方式的优点越不明显。所得结论能够为电缆型配电网中性点接地方式的选择提供理论参考。

关键词: 中性点接地方式; 电缆型配电网; 单相接地故障; 可靠性评估; 最小路法

Reliability evaluation of different grounding cable networks on single-phase grounding fault

XU Yuqin, YANG Hao, LI Peng

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to evaluate the reliability of different grounding cable network, the tripping-rate models when single-phase fault occurs in the line under Petersen coil and low resistance grounding mode are discussed, and the influence on load point's reliability from fault isolation and load transfer is analyzed by combining the characteristics of two grounding modes. By taking advantage of the minimal path method based on the failure mode and effect analysis, different reliability indexes in long-term and short-term are built based on grounding modes. Finally, the cable network reliability of a city in Guangdong is evaluated. The results show that the reliability of Petersen coil grounding mode is higher than that of low resistance grounding mode. But the advantages of Petersen coil grounding mode are less obvious along with the closer connection of the feeders. The conclusions could provide reference for choosing neutral point grounding modes in cable distribution network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577068).

Key words: neutral point grounding mode; cable distribution network; single-phase grounding fault; reliability evaluation; minimal path method

0 引言

近年来随着城市配电网的不断发展, 电缆线路逐渐取代架空线路^[1], 网架结构不断增强, 自动化设备大量使用, 使得城市配电网的结构和特征变得更为复杂^[2-4]。针对配电网的这些特点如何选择合适的中性点接地方式成为了亟待解决的问题, 而不同中性点接地方式对配电网可靠性的影响便是其中的一个关键因素。

目前已有较多文献研究了不同中性点接地方式

对配电网可靠性的影响, 文献[5-6]分别采用了基于相对优势度的区间分析方法和加权多指标区间数灰靶决策算法评估了不同中性点接地方式在提高配电网可靠性方面的优劣。文献[7]分析了消弧线圈接地方式和小电阻接地方式下线路的跳闸原因, 建立了各种情况下线路的跳闸概率模型, 并用蒙特卡罗法计算了两种接地方式下简单配电网的可靠性指标。文献[8]在文献[7]的基础上建立了不同接地方式下每条线路的跳闸率模型, 并通过一辐射型配电网计算了负荷点和系统的可靠性指标。上述文献虽然研究了简单辐射型配电网在不同中性点接地方式下的可靠性, 但没有考虑故障隔离和负荷转移等因素对

可靠性指标的影响,而且只考虑了系统的长时停电指标。文献[9]提出了负荷短时停电的可靠性指标,并建立了不同中性点接地方式下的可靠性指标计算模型。但只研究了一条馈线上负荷的可靠性指标,且只考虑了短时停电次数而没有考虑短时停电时间。

在上述文献的基础上对消弧线圈接地方式和小电阻接地方式下线路发生单相接地故障时的跳闸率模型进行了详细分析,按照线路跳闸时间的长短将跳闸率模型分为长时跳闸率模型和短时跳闸率模型,结合基于故障模式影响分析的最小路法^[10-12]建立了配电网长时停电指标和短时停电指标模型,对以上两种接地方式下的某实际电缆型配电网进行了可靠性评估,得出了接地方式对电缆型配电网供电可靠性的影响。

1 线路的单相接地故障跳闸率模型分析

中性点接地方式的不同只影响到线路单相接地故障时的跳闸模式,目前经济发达城区的配电网都已大量采用电缆线路,所以只分析电缆线路发生单相接地故障时线路的跳闸率模型,下文所提到的线路均为电缆线路。

1.1 消弧线圈接地方式下的线路跳闸率模型分析

中性点经消弧线圈接地时,线路*i*跳闸的原因如下:首先是线路自身发生了永久性电弧不能熄灭的瞬时性单相接地故障。其次是当线路*i*正常运行,其他线路发生了电弧不能熄灭的单相接地故障时可能会发生故障扩展,需要接地选线和故障定位装置快速判断故障区段并使该区段立即跳闸隔离故障,防止发生事故扩展。但是目前接地选线装置的灵敏度还不能达到100%,可能会拒动,从而选不出故障线路(根据广东某市接地选线装置的运行情况,选线失败都是拒动而非错选)使电弧继续燃烧,将故障扩展到线路*i*使其跳闸。上述情况下线路跳闸之后需要经过查找和修复后才能恢复正常运行,所以这些情况下线路*i*的跳闸为长时跳闸。

需要说明的是,当发生电弧能熄灭的永久性故障时,间歇性电弧接地过电压受到抑制^[13]且不会产生电弧火灾,一定时间内发生故障扩展的可能性较小可忽略不计,且电弧燃烧和熄灭时的故障特性有很大区别^[14-15],报警装置能够将它们进行区分,所以可自动或手动延时跳闸,继续运行一段时间(一般为2h)。

当线路发生永久性和电弧不能熄灭的瞬时性故障微机选线失败后,需人工选线,人工选线是通过将母线上各馈线断路器逐一断开观察故障信号的变化来实现的,若断开某条馈线信号消失则故障在

该条馈线上,需迅速离线定位故障区段并隔离,保证非故障区段供电。若信号没有变化,则故障不在该条馈线上,应立即合闸保证供电。

短时跳闸的线路是每条馈线的第一段线路,系统中只有该类线路会发生短时跳闸。该线路跳闸后,这条馈线上的所有负荷经历一次短时停电。

综上所述,消弧线圈接地方式下线路*i*的跳闸模式如图1所示。

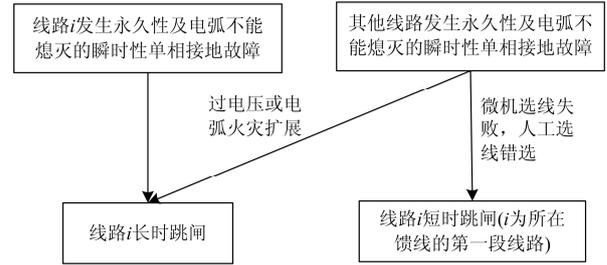


图1 消弧线圈接地方式下线路*i*的跳闸模式

Fig. 1 Tripping mode of line *i* under Petersen coil grounding

1.1.1 线路的长时跳闸率模型

由以上分析可以得出消弧线圈接地方式下线路*i*的长时跳闸率 P_{xci} (次/年)为

$$P_{xci} = P_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_{cij} \quad (1)$$

式中: P_{ii} 为线路*i*发生永久性电弧不能熄灭的瞬时性故障率; P_{cij} 为线路*j*发生电弧不能熄灭的故障时故障扩展到线路*i*使其长时跳闸的概率; n 为系统中线路的总条数。

线路*i*自身发生永久性电弧不能熄灭的瞬时性单相接地故障率 P_{ii} 为

$$P_{ii} = \eta l_i (1 - \delta) + \eta l_i \delta \sigma \quad (2)$$

式中: η 为1公里线路每年的单相接地故障率(次/年); l_i 为线路*i*的长度(km); δ 为瞬时性单相接地故障的概率; σ 为不能熄弧的概率。

线路*j*发生电弧不能熄灭的单相接地故障率 P_{bxj} 为

$$P_{bxj} = \eta l_j \sigma \quad (3)$$

文献[7]已介绍了过电压事故扩展的特点,所以只讨论电弧火灾事故。当电弧不能熄灭时,对于电缆线路,只有正常线路与故障线路发生故障的区域在同一电缆沟内才可能被火灾扩展,所以系统中某条线路故障时电弧火灾扩展到其他线路的概率是不同的,它与两条线路在同一电缆沟内的长度成正比。

定义线路*i*和线路*j*在同一电缆沟内的长度为 l_{ij} , e_2 为电弧火灾事故扩展的概率,当线路*j*故障

时, 正常线路 i 被线路 j 的电弧火灾扩展的概率为 $e_2 l_{ij}/l_j$ 。所以当线路 j 发生电弧不能熄灭的单相接地故障时, 故障扩展到线路 i 使其跳闸的跳闸率 P_{cij} 为

$$P_{cij} = (1 - \omega) P_{bxj} [(e_1 m)/n + (e_2 l_{ij})/l_j - (e_1 e_2 m l_{ij})/n l_j] \quad (4)$$

式中: ω 为微机选线的灵敏度; e_1 为过电压事故扩展率; m 为过电压事故扩展的平均危害程度。

1.1.2 线路的短时跳闸率模型

由上述线路短时跳闸的原因分析可知, 线路的短时跳闸是人工选线错误造成的(理论上会导致同母线近似一半非故障线路短时停电^[10]), 且只有每条馈线的第一段线路发生短时跳闸。另外, 若故障发生扩展, 线路会发生相间短路, 馈线断路器直接跳闸, 也就没有必要选线了, 所以不考虑人工选线时发生故障扩展的情况。可得每条馈线第一段线路的短时跳闸率 P_{xdf} 为

$$P_{xdf} = \frac{1}{2} (1 - \omega) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij} [1 - (e_1 m)/n - (e_2 l_{ij})/l_j + (e_1 e_2 m l_{ij})/n l_j] \quad (5)$$

1.2 小电阻接地方式下线路的跳闸率模型分析

小电阻接地方式下, 由于发生单相接地故障时短路电流较大, 保护装置会立刻跳闸, 且发生单相接地故障时, 系统的过电压较小, 所以忽略小电阻接地方式下发生事故扩展的可能。当主馈线上发生瞬时性单相接地故障后, 断路器立即跳闸后重合, 线路能继续运行。但是分支线路所装开关为负荷开关与熔断器的组合, 当分支线路发生瞬时性故障, 熔断器会在 10 ms 内切除故障, 比断路器提前动作, 所以对于分支线路只要发生故障便会长时跳闸且不会影响其他负荷的供电。所以小电阻接地方式下线路 i 的跳闸模式如图 2 所示。

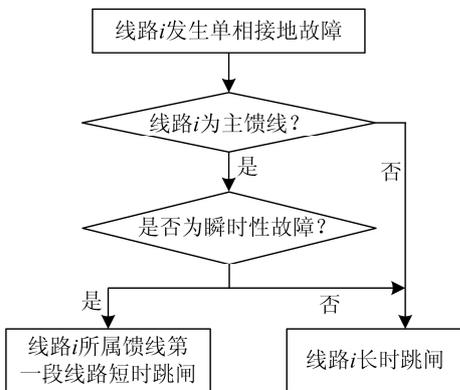


图 2 小电阻接地方式下线路跳闸模式

Fig. 2 Tripping mode under low resistance grounding

所以小电阻接地方式下线路的长时跳闸率 P_{zci} 为

$$P_{zci} = \begin{cases} \eta l_i (1 - \delta) & i \in M \\ \eta l_i & i \in B \end{cases} \quad (6)$$

式中: M 为主馈线集合; B 为分支线集合。

小电阻接地方式下每条馈线引出的第一段线路短时跳闸率 P_{xdf} 为

$$P_{xdf} = \sum_{i=1}^{a_f} \eta l_{fi} \delta \quad (7)$$

式中: l_{fi} 、 a_f 分别为馈线 f 的第 i 条主馈线长度和主馈线条数。

2 配网可靠性影响因素分析与指标计算

在配电网的可靠性评估中需要考虑故障隔离和负荷转移的影响^[16], 下面结合两种接地方式的特点对这些因素进行分析, 并给出可靠性指标的表达式及计算流程。

2.1 配电网可靠性影响因素分析

2.1.1 故障隔离的影响

消弧线圈接地方式下, 当线路发生电弧不能熄灭的故障且微机选线失败时, 需要人工选线断开馈线断路器并隔离故障区段, 若该线路为主馈线则上游负荷会受到故障隔离的影响。若为分支线, 则整条馈线的负荷均受到故障隔离的影响。另外, 被自身或其他线路故障扩展为相间短路时, 馈线断路器会立刻跳闸, 直到故障区段隔离并重新合闸之后, 上游负荷才能恢复供电。其他情况下均能直接断开负荷开关将故障隔离, 上游负荷不会受到影响。

小电阻接地方式下, 由于故障电流较大, 只要主馈线发生故障, 馈线断路器便会立刻跳闸, 当为永久性故障时, 直到将故障区段隔离并重新合闸之后, 其上游负荷才能恢复供电。

2.1.2 负荷转移的影响

目前的城区配电系统大都为有备用电源的环状结构, 正常时以辐射状开环运行, 当某条线路发生故障时, 可以闭合与系统其他部分联系的联络开关, 将负荷转移到系统的其他部分, 使故障线路的下游负荷能够恢复供电, 缩小了停电范围。但并不是每种故障情况下停电的负荷都能转移并恢复供电。首先需要判断当某条线路故障而长时跳闸时, 对于某一个停电的负荷能否与备用电源连通, 若不能连通, 则该负荷不能被转移。当负荷能与备用电源连通时, 还需要考虑备用电源提供的转移容量的限制, 采用文献^[17]提出的考虑容量约束判断单联络馈线负荷能否转移的方法, 对负荷转移进行判断。

2.2 可靠性指标计算模型及计算流程

综合以上分析,采用基于故障模式分析的最小路法对配电网可靠性进行评估。由文献[12]可知,两种接地方式下,负荷点*i*最小路中的元件都为其在所在节点到电源点的主馈线和其所在的分支线。而对于非最小路中的元件,消弧线圈接地方式下为负荷点*i*所在节点的下游主馈线,以及其所在馈线的所有分支线(除其自身所在的分支线)。小电阻接地方式下仅为负荷点*i*所在节点的下游主馈线。

2.2.1 消弧线圈接地方式的可靠性指标计算模型

两种接地方式下造成负荷长时停电的原因都是负荷点最小路中的线路发生了长时跳闸,且负荷不能转移造成的,所以消弧线圈接地方式下负荷点*i*的长时停电率 λ_{xci} (次/年)为

$$\lambda_{xci} = \sum_{j=1}^q P_{xcj} \quad (8)$$

式中: P_{xcj} 为负荷点*i*最小路中线路*j*的长时跳闸率,线路*j*长时跳闸后,负荷点*i*不能转移到其他部分恢复供电; q 为最小路中线路*j*的条数。

对于长时停电时间,线路自身发生永久性单相接地故障,若电弧能够熄灭,则能带故障运行2h,而当电弧不能熄灭时,可能会发生事故扩展,需要微机或人工选线,使故障线路尽快跳闸并隔离。另外当其他线路发生了电弧不能熄灭的故障时,若故障扩展到该线路发生相间短路时也会使其立刻跳闸。因此消弧线圈接地方式下线路*j*的平均长时跳闸时间 r_{pcj} (h/次)为

$$r_{pcj} = [(r_t - 2)l_j(1 - \delta)(1 - \sigma) + r_t(\eta l_j \sigma + \sum_{o=1}^n P_{co})]/P_{xcj} \quad (9)$$

式中: r_t 为线路查找和修复的时间; P_{co} 为线路*o*故障扩展到线路*j*的概率。

所以在消弧线圈接地方式下负荷点*i*的平均长时停电时间 r_{xci} 为

$$r_{xci} = (\sum_{j=1}^q P_{xcj} \cdot r_{pcj})/\lambda_{xci} \quad (10)$$

消弧线圈接地方式下负荷点*i*的短时停电率,需考虑负荷点*i*所在馈线第一段线路的短时跳闸率以及故障隔离和负荷转移的影响。因此,消弧线圈接地方式下负荷点*i*的短时停电率 λ_{xdi} 为

$$\lambda_{xdi} = P_{xdf} + \sum_{k=1}^s P_{xcck} + (1 - \omega) \sum_{l=1}^t P_{bxl} + \sum_{m=1}^u P_{kzm} \quad (11)$$

式中: P_{xcck} 为负荷点*i*最小路中线路*k*的长时跳闸率,线路*k*长时跳闸后,负荷点*i*能转移到其他部分恢复供电; P_{bxl} 和 P_{kzm} 分别为负荷点*i*的非最小路中线路发生电弧不能熄灭和主馈线被扩展为相间故障的概率; s 为负荷点*i*最小路中线路*k*的条数; t 为非最小路中线路总条数; u 为非最小路中主馈线的条数。

由于人工选线错误后重新合闸时间为10s以内,可忽略不计。因此消弧线圈接地方式下负荷点*i*的平均短时停电时间 r_{xdi} (min/次)为

$$r_{xdi} = \{r_g \cdot [(1 - \omega) \sum_{l=1}^t P_{bxl} + \sum_{m=1}^u P_{kzm}] + r_z \cdot \sum_{k=1}^s P_{xcck}\} / (\lambda_{xdi} - P_{xdf}) \quad (12)$$

式中: r_g 为故障隔离的时间; r_z 为联络开关倒闸操作的时间。

得出负荷点*i*的长时停电率、平均长时停电时间、短时停电率和短时停电时间后,便可得其年平均停电时间 u_{xi} (h/年)为

$$u_{xi} = \lambda_{xci} r_{xci} + \lambda_{xdi} r_{xdi} \quad (13)$$

2.2.2 小电阻接地方式的可靠性指标计算模型

小电阻接地方式下负荷点*i*的长时停电率 λ_{zci} 为

$$\lambda_{zci} = \sum_{j=1}^q P_{zcj} \quad (14)$$

式中, P_{zcj} 与 P_{xcj} 含义类似。

对于小电阻接地方式,负荷点*i*的平均长时停电时间就为线路的查找和修复时间 r_t 。

小电阻接地方式下负荷点*i*的短时停电指标与消弧线圈接地方式下所考虑的因素相同,可得小电阻接地方式下负荷点*i*的短时停电率 λ_{zdi} 为

$$\lambda_{zdi} = P_{zdf} + \sum_{k=1}^s P_{zck} + \sum_{m=1}^u P_{zcm} \quad (15)$$

式中, P_{zcm} 为负荷点*i*下游主馈线*m*的长时跳闸率。

同理,小电阻接地方式下负荷点*i*的平均短时停电时间 r_{zdi} 为

$$r_{zdi} = \frac{r_z \cdot \sum_{k=1}^s P_{zck} + r_t \cdot \sum_{m=1}^u P_{zcm}}{\lambda_{zdi} - P_{zdf}} \quad (16)$$

小电阻接地方式下负荷的年平均停电时间与消弧线圈接地方式下类似。

2.2.3 可靠性指标计算的流程

不同中性点接地方式下负荷点及系统的可靠性指标计算流程图如图3所示。

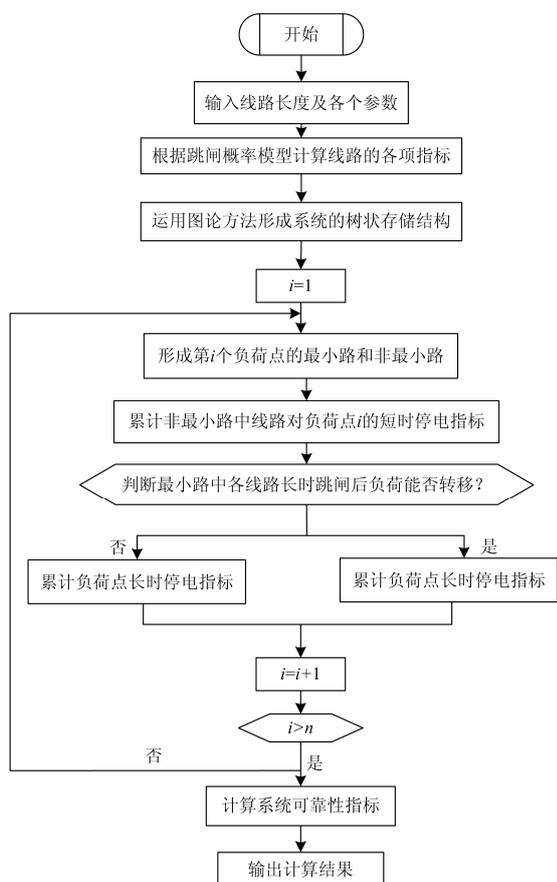


图3 不同接地方式电缆型配电网的可靠性计算流程图

Fig. 3 Reliability calculation flow chart of cable distribution network under different grounding modes

3 算例分析

广东省某市的城区部分中压电缆型配电网如图4所示。

图中包含6条馈线分别为F1~F6, 它们来自于同一变电站的同一条母线, 其中F1和F2组成“2-1”单环网的接线形式, F3、F4、F5组成两供一备的接线形式, F5为备用线路, 不接负荷。F6为单辐射式接线, 没有备用电源。该系统共包含45个负荷点、80条线路(不包括F5)。根据该市配电网运行的统计数据^[10], 电缆线路的单相接地故障率为 $\eta=0.0568$ (次/年), 瞬时性接地故障概率为 $\delta=0.2$, 电弧不能熄灭的概率为 $\sigma=0.25$, 过电压扩展率为 $e_1=0.1$, 电弧火灾扩展率为 $e_2=0.1$, 消弧线圈接地方式下微机选线的准确率为 $\omega=0.8$, 线路的查找和修复时间为 $r_f=7$ h, 故障隔离的时间 $r_g=3$ min, 联络开关倒闸操作时间 $r_z=6$ min。确定各参数后运用以上分析的模型和计算流程对图4所示的电缆型配电网的可靠性进行了评估, 计算结果见表1—表3。

从表1计算结果的对比可以看出, 对于长时停电指标, 消弧线圈接地方式下, 系统长时停电频率比小电阻接地方式下略高, 这是由于消弧线圈接地方式下, 会发生故障扩展的缘故, 而系统平均长时停电持续时间比小电阻接地方式短, 是因为消弧线圈接地方式下发生电弧能熄灭的永久性单相接地故障时, 能带故障运行2 h。

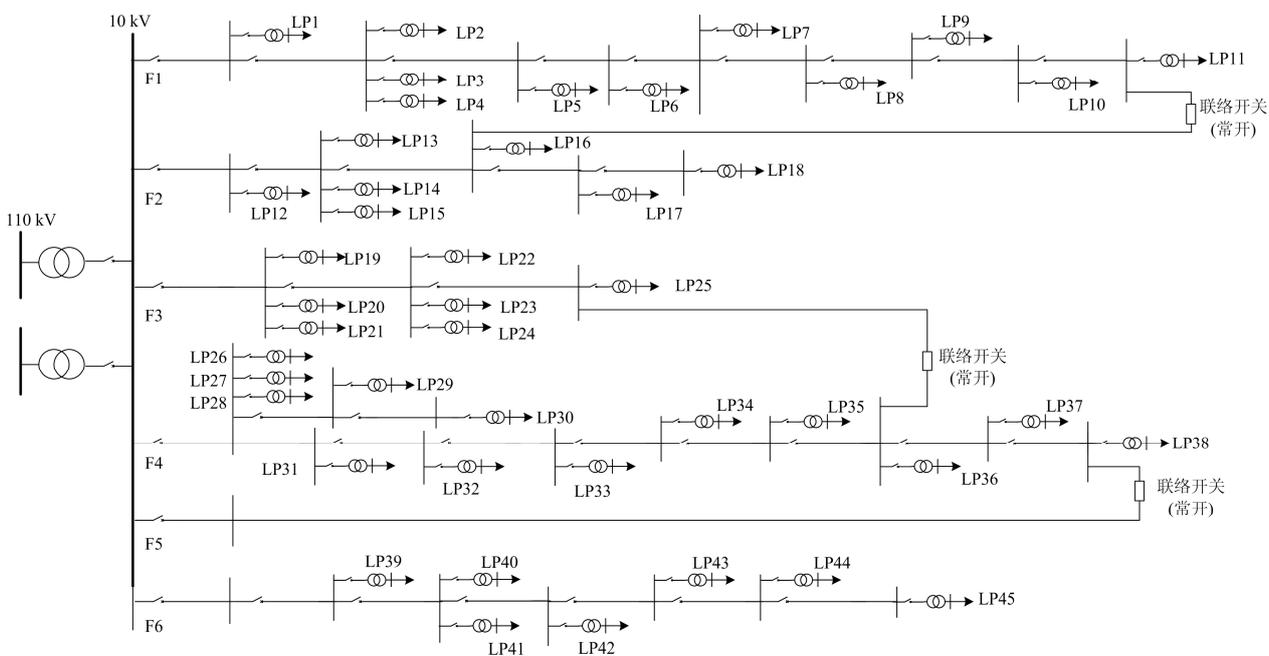


图4 广东某市部分中压配电系统

Fig. 4 A part of medium voltage power distribution system of a certain city in Guangdong province

表 1 两种接地方式下系统的可靠性指标

Table 1 System reliability index under two grounding modes

可靠性 指标	消弧线圈接地		小电阻接地	
	长时停电指标	短时停电指标	长时停电指标	短时停电指标
SAIFI	0.022 0 次/(户·年)	0.125 3 次/(户·年)	0.021 8 次/(户·年)	0.183 3 次/(户·年)
SAIDI	0.123 3 h/户	0.709 6 min/户	0.152 9 h/户	0.880 9 min/户
CAIDI	5.612 0 h/次	5.665 0 min/次	7 h/次	4.805 2 min/次
AISI	99.985%		99.979%	
AENS	0.433 5 MW·h/年		0.536 8 MW·h/年	

表 2 消弧线圈接地方式下典型负荷点可靠性指标

Table 2 Reliability index of typical load point
under Petersen coil grounding

负荷点	λ_{sci}	r_{sci}	λ_{sdi}	r_{sdi}	u_{si}
LP9	0.014 2	5.613 4	0.166 8	5.844 1	0.096 0
LP17	0.021 0	5.617 3	0.129 4	5.963 6	0.130 8
LP22	0.015 3	5.628 2	0.103 6	5.824 5	0.096 2
LP30	0.017 3	5.629 2	0.124 2	5.231 9	0.108 2
LP39	0.068 4	5.602 8	0.014 0	3	0.383 9
LP44	0.189 6	5.599 3	0.002 2	3	1.060 6

表 3 小电阻接地方式下典型负荷点可靠性指标

Table 3 Reliability index of typical load point
under low resistance grounding

负荷点	λ_{sci}	r_{sci}	λ_{sdi}	r_{sdi}	u_{si}
LP9	0.016 4	7	0.236 4	5.003 1	0.134 5
LP17	0.019 5	7	0.111 1	5.766 0	0.147 2
LP22	0.017 4	7	0.115 8	5.278 7	0.132 0
LP30	0.018 2	7	0.226 0	4.331 1	0.143 7
LP39	0.066 1	7	0.192 5	3	0.472 3
LP44	0.177 3	7	0.070 9	3	1.244 6

而对于短时停电指标,小电阻接地方式下,系统短时停电频率和系统平均短时持续时间都比消弧线圈接地方式下高,这主要是因为小电阻接地方式下负荷点的供电可靠性受到故障隔离影响的可能性更大。

由以上的分析可得,小电阻接地较消弧线圈接地,长时停电指标和短时停电指标均有一定差距,且短时停电指标的差距更为突出。根据第 1 节的分析,若能够提高消弧线圈的熄弧能力和微机选线的准确率,消弧线圈接地方式下的供电可靠性会进一步提高。

从表 2、表 3 的对比可以看出,对于无备用接线单辐射线路上的负荷,小电阻接地方式下的可靠性较消弧线圈接地方式下的差距较为明显,而当线路联络越紧密,小电阻接地方式下的可靠性与消弧线圈接地方式下的差距越不明显。目前的城市配电网各馈线间联络相当紧密,虽然消弧线圈接地方式

较小电阻接地方式能够提高系统的可靠性,但是也需考虑可靠性的提高与投入成本的比例,不能一味追求高可靠性。

4 结论

对不同中性点接地方式下线路的跳闸率模型进行了分析,并提出了线路的长时跳闸率模型和短时跳闸率模型,结合基于故障模式影响分析的最小路法,建立了配电网长时停电指标和短时停电指标,对不同中性点接地方式下的广东某市实际电缆型配电网进行了可靠性评估,结果表明:

1) 消弧线圈的熄弧能力和接地选线装置的灵敏度较高时,中性点选择经消弧线圈接地,系统的供电可靠性更高,且随着熄弧能力和选线装置灵敏度的提高,消弧线圈接地方式下的供电可靠性会进一步提高。

2) 消弧线圈接地方式下系统长时停电频率比小电阻接地方式下略高,系统平均长时停电持续时间比小电阻接地方式下短。小电阻接地方式下,系统短时停电频率和系统平均短时持续时间都比消弧线圈接地方式下高。

3) 各馈线的联络越紧密,小电阻接地方式较消弧线圈接地方式供电可靠性的差距越不明显,所以在选择中性点接地方式时,需要考虑可靠性的提高与投入成本的比例。

参考文献

- [1] 李喆,赵学风,林涛. 电缆网络数字化管理系统建设及其应用[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(4): 75-78.
LI Zhe, ZHAO Xuefeng, LIN Tao. Construction and application of cable network digital management system author[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(4): 75-78.
- [2] HUANG Junhui, GE Shaoyun, HAN Jun. A diagnostic method for distribution networks based on power supply safety standards[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 63-70. DOI: 10.1186/s41601-016-0020-2.

- [3] 潘翀, 袁霞, 唐伦. 大型城市高压配电网可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 131-138.
PAN Chong, YUAN Xia, TANG Lun. Reliability analysis for high voltage distribution network in big cities[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 131-138.
- [4] 姚刚, 仲立军, 张代红. 复杂城市配电网网格化供电组网方式优化研究及实践[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1297-1301.
YAO Gang, ZHONG Lijun, ZHANG Daihong. Research and practice of mesh-networking optimization for power supply by complex urban distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1297-1301.
- [5] 曹珍崇, 何俭声, 杨学昌, 等. 中性点接地方式对配电网可靠性影响的区间分析[J]. 广西电力, 2007, 30(5): 5-7.
CAO Zhenchong, HE Jiansheng, YANG Xuechang, et al. Interval analysis about influence on reliability of power distribution lines with various grounded neutrals[J]. Guangxi Electric Power, 2007, 30(5): 5-7.
- [6] 曹珍崇, 王文立, 杨学昌, 等. 中性点接地方式的加权多指标区间数灰靶决策算法[J]. 广西电力, 2007, 30(6): 1-5.
CAO Zhenchong, WANG Wenli, YANG Xuechang, et al. Decision arithmetic of neutral grounding mode based on interval multi-attribute weighted grey target theory[J]. Guangxi Electric Power, 2007, 30(6): 1-5.
- [7] 董雷, 何林, 蒲天骄. 中性点接地方式对配电网可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 96-101.
DONG Lei, HE Lin, PU Tianjiao. Effect of neutral grounding mode on reliability of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 96-101.
- [8] 恭秀芬. 中压配电网中性点接地方式研究与决策[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
GONG Xiufen. Research and decision-making about the neutral point grounding mode for medium-voltage distribution network[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [9] 郭丽伟, 薛永端, 徐丙垠, 等. 中性点接地方式对供电可靠性的影响分析[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2340-2345.
GUO Liwei, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Research on effects of neutral grounding modes on power supply reliability in distribution networks[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2340-2345.
- [10] 周念成, 谢开贵, 周家启, 等. 基于最短路的复杂配电网可靠性评估分块算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(22): 39-44.
ZHOU Niancheng, XIE Kaigui, ZHOU Jiaqi, et al. Reliability evaluation of large scale distribution systems using the shortest path algorithm and section technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(22): 39-44.
- [11] 张小娟, 李泽荣, 张重远, 等. 基于最小路法的配电网可靠性评估[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(8): 24-28.
ZHANG Xiaojuan, LI Zerong, ZHANG Zhongyuan, et al. Distribution system reliability assessment based on minimal path method[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(8): 24-28.
- [12] XIE K, Zhou J, BILLINTON R. Reliability evaluation algorithm for complex medium voltage electrical distribution networks based on the shortest path[J]. IEEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 2003, 150(6): 686-690.
- [13] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2009: 70-79.
- [14] 陈博博, 屈卫锋, 杨宏宇, 等. 小电流接地系统单相接地综合电弧模型与选线方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 1-7.
CHEN Bobo, QU Weifeng, YANG Hongyu, et al. Research on single phase grounding arc model and line selection for neutral ineffectively grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 1-7.
- [15] 杨柳林, 李德奎, 陈延明, 等. 基于 RTDS 的电弧接地故障自定义建模及仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 137-142.
YANG Liulin, LI Dekui, CHEN Yanming, et al. User defined modeling and simulation of arc grounding fault based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 137-142.
- [16] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2014: 149-165.
- [17] 邱生敏, 王浩浩, 管霖. 考虑复杂转供和预安排停电的配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 121-126.
QIU Shengmin, WANG Haohao, GUAN Lin. An improved algorithm for reliability assessment of distribution network considering complex load transfer and scheduled outage[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 121-126.

收稿日期: 2017-07-10; 修回日期: 2017-09-24

作者简介:

徐玉琴(1964—), 女, 教授, 主要研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: xuyuqin_ncepu@126.com

杨浩(1993—), 男, 硕士, 主要研究方向为配电网中性点接地方式。E-mail: 1119844306@qq.com

(编辑 许威)