

基于故障状态模拟的输电线路短路点定位方法

张铃珠

(国网宁夏电力有限公司经济技术研究院, 宁夏 银川 750001)

摘要: 输电线路是电力系统的重要组成部分, 容易发生各种短路故障。为了保持系统的完整性, 必须尽快确定故障位置以恢复系统正常运行。基于阻抗的故障定位算法是目前最常用的, 但它们容易受如故障电阻和线路之间的相互耦合等多种误差源影响, 并且有关互耦或复杂网络配置的信息也不能直接用于基于阻抗的故障定位算法。因此, 提出了一种基于系统故障状态仿真模拟的短路点自动定位方法, 利用电力系统仿真软件和控制出力软件整合所有可用的系统信息, 从而准确地定位短路故障的发生位置。最后, 通过仿真测试验证了所提方法的有效性和精确性, 能够很好地应对诸如相互耦合和故障电阻等因素干扰。

关键词: 故障状态模拟; 故障定位; 短路模型; 输电线路

中图分类号: TM723 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)05-0056-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.05.013

A Short-circuit Location Method for Transmission Line Based on Fault State Simulation

Zhang Lingzhu

(State Grid Ningxia Economic Research Institute, Yinchuan 750001, Ningxia, China)

Abstract: Transmission lines are a vital part of power system and are prone to a variety of short-circuit faults. It is imperative to identify the fault location to restore the system as quickly as possible for maintaining the system integrity. Impedance-based fault location algorithms are most commonly used but they are prone to several sources of errors such as fault resistance and mutual coupling between the lines and may not provide accurate results in the presence of complex network configurations such as three-terminal lines. Though the information about mutual coupling or knowledge of complex network configuration is known, they cannot be directly used in impedance-based fault location algorithms. A novel automated generic framework for model-based fault location approach is proposed which uses the power system model to overcome the shortcomings of impedance-based fault location methods. A combination of power system simulation software and a control and processing software provide the flexibility to be able to incorporate all the available information about the system to accurately estimate the fault location. Furthermore, the key insights to implement the proposed framework in an effective and efficient manner are provided by using reduced equivalent circuits.

Key words: fault state simulation; fault location; short-circuit model; transmission line

0 引言

输电线路将电能从发电厂输送到用户侧, 是电力系统的重要组成部分^[1]。但由于往往处于野外或恶劣环境下, 输电线路经常会受到各种电气故障和环境的影响, 如雷击或暴风雨天气下导线相互接触、动物或树木与输电线路接触以及绝缘故障等^[2]。当输电线路发生故障时, 必须尽快对故障进

行定位和消除, 以减少用户所面临的电能质量问题的持续时间, 并防止对输电网络其余部分造成进一步的影响^[3]。

通常, 继电保护设备会在故障时动作断开故障线路, 并记录设备电流、电压和状态信号。从智能电子设备(intelligent electronic devices, IEDs)或数字故障记录器(digital fault recorders, DFRs)等获得的故障记录需要进行预处理, 以获得所需的有用故障数据, 随后可分析该数据并将其用于故障定位算

法^[4]。输电线路的中断会导致周围其他输电线路的堵塞加剧,还会降低不同区域间功率传输的灵活性。相邻输电线路的负荷增加超过其额定容量可能进一步导致线路跳闸,产生级联效应,最终发生停电事故^[5]。因此,在输电线路停运的情况下,一个地区的电力系统是很难长时间维持的,而准确无延迟地定位故障位置对于保持系统的稳定性和完整性来说则是至关重要^[6]。

现代数字继电器普遍采用基于阻抗的故障定位算法进行故障位置估计,这一方法简单易用,当故障条件与算法开发过程中的假设相匹配时,它们能够提供合理的故障位置估计^[7]。但基于阻抗的故障定位方法的准确性会受到包括负载、线路之间的耦合、CT饱和、线路模型不准确、提取故障电流和电压不准确、存在3条终端线、分接径向线等^[8]在内的影响。

基于以上分析,提出一种基于系统故障状态仿真模拟的输电线路短路点定位方法,该方法利用电力系统的短路模型实现手动故障定位程序的自动化。通过在测试电路中实现各种故障情况下的故障定位技术,验证了所提方法的性能,并证明了所提方法对于干扰故障定位算法精度的常见因素(如存在相互耦合和故障电阻)的适用性。

1 基于系统故障状态仿真模拟的短路点定位

1.1 定位方法流程

电力公司利用几种不同的商业电力系统仿真和故障分析平台(simulation and fault analysis platforms, SFAP)对输电网络及其保护系统进行建模。网络约简是大多数电力系统分析和保护工程软件的一个常见特征。利用这一特性,可以建立一个包含电力系统网络不同部分的等效电路简化库。简化等效电路库需要在电力系统仿真软件(power system simulation software, PSSS)中建模,该软件可以由外部软件驱动,从而能够自动驱动和模拟不同的故障场景。

来自故障记录设备的信息使用控制处理软件(control and processing software, CPS)进行处理,CPS读取故障记录,并根据DFR位置从等效电路库中选择适当的简化等效电路,所选的并在PSSS中建模

的等效电路用于进行故障分析,将故障分析得到的数据与DFR得到的数据进行比较,从而估计出故障位置。

当接收到故障记录时,CPS首先从DFR读取故障记录,执行故障记录的预处理步骤,从故障记录中提取故障电流、故障电压、故障发生的瞬间以及DFR的位置。然后,从电路库中识别正确的等效电路,一旦识别出等效电路便可以在PSSS中对选定的等效电路沿线路长度在不同位置对故障进行模拟,并获得故障电流和电压。最后将模拟数据与从数据文件夹中获取的故障记录中的实际故障电流进行比较,根据比较中的最佳匹配来提供故障位置估计。

1.2 故障定位方法的原理

每个事件报告都有很多标识信息,可用于识别记录该特定事件报告的继电器,一旦识别出继电器,就可以选择聚焦于继电器所在区域的等效电路进行分析。当CPS接收到故障记录时,即识别出适当的简化等效电路,其中包含来自简化等效电路库的故障线路,该库包含电力系统网络的各个部分。CPS可以利用故障记录中存在的故障记录器信息来识别适当的简化等效电路。一旦选择了适当的简化等效电路,可以在各种故障情况下,沿着简化等效电路中的每条线路进行故障模拟。这似乎是一个冗长而费时的过程,但应用简化的等效电路可以大大提高故障定位的效率。在每一个模拟场景中,可以得到所有母线和线路的电流,并以相量格式存储电流,降低了该方法的内存需求。

下一步是从事件报告中提取故障电流相量,然后将故障记录计算出的故障电流与从模拟场景中获得的所有电流值进行比较。模拟场景与故障录波器记录的故障电流密切匹配,从而给出故障位置估计。以任何监测位置模拟故障电流与实际记录的故障电流之间包含最小欧氏距离(当相量以直角坐标表示时)的模拟故障情景表示最接近的匹配。每条线路中模拟的不同位置和故障电阻值的数量取决于计算机计算和存储能力,模拟的场景数量越多,故障位置估计的精度就越高。保护工程师计算机的计算能力和内存可用性以及所需的精度,在简化等效电路中每条线路上模拟的场景数量需要由执行系统研究的保护工程团队进行配置。与较短的线相比,长线具有更多的模拟场景数。

由于在每个模拟场景中存储了流经所有线路和母线的电流,因此不仅可以利用流经故障线路的故障电流来识别故障位置,还可以使用流过相邻母线和线路的电流来识别故障位置。这提供了巨大的优势,如可用相邻线路中继器记录的事件报告验证由故障线路中的故障电流估计的故障位置。此外,若故障线路的故障记录受到 CT/VT 误差的影响,则可以使用线路另一端或相邻线路的故障记录来识别故障位置。

2 故障定位方法的实现与验证

2.1 实施框架

为了进行故障定位,在形成简化等效电路时,通常会遇到 4 个主要部件,分别是发电机、输电线路、连接母线和两条线路之间的相互耦合,所有这些组件都可以在 PSSS 中建模,并且独立于整个系统模型可用的实用程序所使用的软件。

2.2 测试电路

采用 SFAP 中可用的一个示例电路对所提方法进行分析和验证。该电路包含 103 条母线,187 条支路或线路,26 组耦合线路,2 组耦合母线。从这种大电路模型中可以得到多个聚焦于不同区域的简化等效电路。对由该大电路发展而来的简化等效电路进行故障分析,用简化等效电路法证明所提基于系统故障状态仿真模拟的短路点定位方法的能力。

2.3 等效电路

大多数商用电力系统分析软件都提供了一个网络简化模块。尽管可以使用任何电路缩减方法,但这种情况下使用的电路缩减形式会根据需要减少母线数量,并引入等效源和线路阻抗,以模拟缩减后的原始短路特性。此外,在模拟整个简化等效电路的故障场景时,可以忽略电路简化后新创建的等效线路阻抗上的故障,因为这些线路实际上并不存在于原始电力系统中。

在验证时,形成了仅包括母线 40、2876、156、152、150、153 和 160 的简化等效电路。选择电路的这一部分进行测试是因为它包含 1.1 节讨论的输电系统的所有主要部件,包括母线连接和线路之间的相互耦合,且不包括发电机。这有助于验证在网络缩减期间是否创建了适当的等效电源,以保持系统

的短路特性。电路在母线 40 和母线 156、母线 150 和母线 153、母线 152 和母线 153、母线 153 和母线 160、母线 153 和母线 156 以及母线 156 和母线 2876 之间有线路连接,其他线路将这些母线中的一些连接到电路的其余部分,但它们在电路缩减时将被移除。母线 150 和母线 153 之间以及母线 152 和母线 153 之间的线路相互耦合,母线 150 和母线 152 之间有一个母线联络开关连接,是闭合的。

2.4 测试电路验证

当故障记录到达目标文件夹时,从故障记录中获取稳态故障电压和电流将 SFAP 中使用全电路模型模拟故障场景时获得的故障电流输入到 CPS 中,并在 CPS 中执行搜索查找算法,在 CPS 接收到故障信号时,使用简化的等效电路来识别故障位置。当 CPS 接收到一组故障电流时,即可通过有关故障记录器的信息来识别要使用的简化等效电路。然后,在等效电路中存在的所有线路上模拟各种故障情况,并将模拟得到的故障电流与目标故障电流中相匹配。

SFAP 中用于分析的全电路模型是一种不考虑负载电流的经典短路模型,这对于本测试算例场景也是适用的,因为所提方法适用于输电线路。与故障电流的大小相比,负载电流的影响可以忽略不计。因此,在使用各种基于阻抗的方法估计故障位置时,预设电流为 0 pu,预设电压为 1 pu。

1) 场景 1: 等效电路验证

表 1 给出了 SFAP 中实现的全电路模型中获得的故障电流以及 CPS 使用搜索和查找算法在 PSSS 简化等效电路中找到的匹配。

考虑的第 1 个故障情况是母线 153 和母线 156 之间距离母线 153 侧的 20% 线路长度处的线路 A 相单线接地故障,故障电阻为 0Ω 。之所以选择这条线路,是因为它代表了一种最常见的情况,即线路是网络的一部分,并且在线路两端具有互连。当线路出现故障时,故障电流可从线路两端流入故障点。由表 1 可以看出, SFAP 中存在的完整电路模型中,从母线 153 流入故障点的 A、B、C 三相线路电流分别为 $4693.02 \angle -76.7^\circ$ 、 $7.94 \angle -97.3^\circ$ 、 $7.94 \angle -97.3^\circ$ A; 从母线 156 流入故障点的 A、B、C 三相线路电流分别为 $1245.27 \angle -73.7^\circ$ 、 $7.94 \angle -82.7^\circ$ 、 $7.94 \angle -82.7^\circ$ A。可以发现,所提方法能够精确地识别从模拟简化等效电路中的故障场景获得的电流值与目标电流之间

表1 等效电路验证

线路153—156在靠近母线153一侧的20%处A相发生单线接地故障,故障电阻0 Ω						
电流	从母线153流入的线电流/A			从母线156流入的线电流/A		
	A相	B相	C相	A相	B相	C相
全电路(SFAP)	4 693.02 ∠ -76.7	7.940 ∠ -97.3	7.940 ∠ -97.3	1 245.27 ∠ -73.7	7.940 ∠ -82.7	7.940 ∠ -82.7
简化等效电路(CPS和PSSS)	4 693.02 ∠ -76.7	7.940 ∠ -97.3	7.940 ∠ -97.3	1 245.27 ∠ -73.7	7.940 ∠ -82.7	7.940 ∠ -82.7
故障点监测	线路153—156在靠近母线153一侧的20%处发生故障,故障电阻0 Ω					

表2 分接点前三端线路故障

电流	从母线153流入的线电流/A			从母线156流入的线电流/A		
	A相	B相	C相	A相	B相	C相
故障电流	4 693.02 ∠ -76.7	7.940 ∠ -97.3	7.940 ∠ -97.3	1 245.27 ∠ -73.7	7.940 ∠ -82.7	7.940 ∠ -82.7
估计故障位置	线路153—156在靠近母线153一侧的20%处A相发生单线接地故障,故障电阻0 Ω					

表3 分接点后三端线路故障

电流	从母线153流入的线电流/A			从母线2876流入的线电流/A		
	A相	B相	C相	A相	B相	C相
故障电流	773.4 ∠ -69	36.9 ∠ -118	36.9 ∠ -118	0 ∠ 0	0 ∠ 0	0 ∠ 0
估计故障位置	线路156—2876在靠近母线156一侧的60%处A相发生单线接地故障,故障电阻3 Ω					

表4 耦合线路故障

电流	从母线153流入的线电流/A			从母线152流入的线电流/A		
	A相	B相	C相	A相	B相	C相
故障电流	3 252.52 ∠ -74.9	145.691 ∠ -110.4	145.691 ∠ -110.4	5 375.81 ∠ -78.2	145.691 ∠ -69.6	145.691 ∠ -69.6
估计故障位置	线路153—152在靠近母线153一侧的50%处A相发生单线接地故障,故障电阻0.4 Ω					
电流	从母线153流入的线电流/A			从母线152流入的线电流/A		
	A相	B相	C相	A相	B相	C相
故障电流	2 250.32 ∠ -47.8	114.237 ∠ -137.6	114.237 ∠ -137.6	4 215.21 ∠ -51.0	114.237 ∠ -42.4	114.237 ∠ -42.4
估计故障位置	线路153—152在靠近母线153一侧的50%处A相发生单线接地故障,故障电阻5 Ω					

的匹配,从而精确地确定故障位置点。

2) 场景2: 三端线路故障

场景2说明了所提方法在三端线路上任意位置定位故障的能力。母线153和母线40之间的线路在母线156处分接到母线2876。在153号母线处测得的故障记录用于基于阻抗的算法估计故障位置。表2为在分接点(总线156)之前的三端线路上产生的故障情况,故障点在母线153和母线156之间的线路上。基于阻抗的故障定位算法能够产生合理的结果,而所提算法得到了更准确的结果。表2中基于阻抗的故障定位算法显示的故障位置为占母线153和母线156之间线路长度的百分比,因为故障在分接点之前。而对于故障发生在分接点之后这种情况,表3中

基于阻抗的故障定位算法将故障位置显示为母线153和母线2876之间线路长度的百分比,因为故障位于分接点之后,并且高估了故障位置。然而,在简化等效电路中,将三端线路建模为从母线153、母线40和母线2876到分接头点(母线156)的3条独立线路,因此,它能将故障位置识别为母线156和母线2876之间的线路上的故障,如表3所示。

如前所述,基于阻抗的故障定位算法无法在故障超过分接头点时准确估计故障位置。而所提方法即使在故障超过分接头点且具有非零故障阻抗的情况下也能准确地找到故障位置。

3) 场景3: 相互耦合线路上的故障

场景3证明了与其他常用的基于阻抗的方法相

比,所提方法在相互耦合线路上定位故障的效率。母线150和母线153之间以及母线152和母线153之间的线路相互耦合。从表4所示的结果来看,当存在故障电阻时,基于阻抗的算法的故障位置估计误差更为明显。另一方面,所提算法具有较强的鲁棒性,即使在存在故障阻抗的情况下,也能为互耦线路中的故障提供准确的故障定位。

针对上述每个场景模拟了很多测试用例,并展示了选定的几个测试用例。表1至表4所示的结果表明,与常用的基于阻抗的故障定位算法相比,所提算法的优越性及其所具有的潜力。由于故障定位程序依赖于数据库中存在的系统模型,因此当电力系统中存在系统状态或拓扑变化时,有必要相应地更新简化等效电路库。计算的速度和复杂性不是问题,因为分析是离线分析,而不是实时分析。此外,由于采用了唯一的简化等效电路代替了全电路模型,大大降低了计算机系统的计算负担,可以快速模拟各种故障情况。

2.5 故障电阻

所提出的方法能够模拟电力系统的状况和故障情景,从而获得高精度的结果。因此,系统的建模和故障场景越好以及任何可能做出的假设越少,故障位置估计就越准确。在模拟故障情况时,一个关键的未知因素是故障阻抗,因为它会影响故障电流和故障电压。故障阻抗在自然界中通常是电阻性的,由树木和动物等物体引起,单相接地故障是最常见的输电线路故障情况。单相接地故障的故障相电流可写为

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 3I_1 = \frac{3V_F}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_F} \quad (1)$$

式中: V_F 为故障点前电压; I_0 、 I_1 、 I_2 为流过电路的各序电流; Z_0 、 Z_1 、 Z_2 为电路各序阻抗; Z_F 为故障阻抗。

由式(1)可知,故障电阻的变化会影响故障电流的实部和虚部分量或故障电流相量的大小和角度。此外,由于故障阻抗本质上是电阻性的,因此在沿输电线的不同距离设置故障(输电线本质上主要是感性的)时,由于不同的电阻值而获得的故障电流相量不会重叠。如图1和图2所示。

图1显示了在母线153和母线156之间的输电线上,故障电流分布随故障电阻的变化情况,监视器放置在母线153处,监视故障线路。对于每个故障电阻值,在整个输电线路的不同位置设置A相单相接地故障,并绘制了由此产生的A相故障电流,该

图采用离散电阻值来验证所提概念。可以观察到,改变故障电阻会导致线路偏向于相应的金属性故障情况,并且不与任何其他情况重叠,确保采用所提方法进行故障位置估计不会受到故障阻抗的影响。无论线路是否耦合,都会表现出此特性。考虑另一个输电线与另一条线耦合的例子,图2为母线152和母线153之间相互耦合的输电线上的故障电流随电阻的变化情况,监视器置于母线153处,测量故障线路中的电流。可以看出,在这种情况下也表现出类似的特征。因此,可以得出结论,故障电阻的存在并不影响所提出的故障定位算法对故障的定位。此外,还可以通过故障电流识别出故障阻抗。

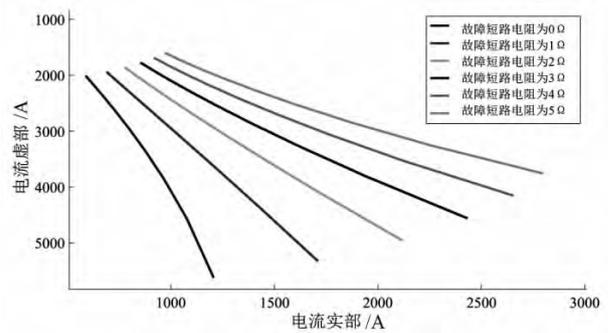


图1 故障电流随电阻变化(线路153—156)

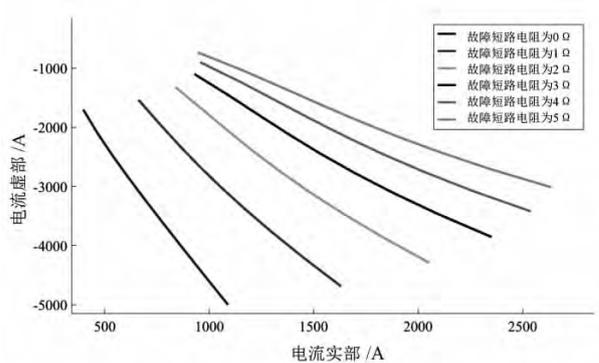


图2 故障电流随电阻变化(线路152—153)

3 结语

提出了一种基于系统故障状态仿真模拟的短路点自动定位方法。利用简化等效电路提高了故障定位的效率,有助于故障定位过程的自动化。该方法的主要优点是通用性强,可以克服目前广泛使用的基于阻抗的故障定位算法的缺点。任何电力系统网络配置及其设备都可以建模,并且可以反映实际电力系统特性,而无需做出任何假设。在所提方法中,可以对诸如三端线路等复杂配置和互耦现象等进行

建模,并将其用于故障定位,而在常用的基于阻抗的故障定位算法中,是不能直接利用这些参数的。所提方法可以灵活地包含系统的所有可用信息,这使得该方法具有高度的准确性。

参考文献

[1] 叶昌荣,冯树海,徐鹏,等. 基于故障录波数据同步技术的输电线路参数辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 156-161.

[2] Ram, B., Vishwakarma, D. N. Power System Protection and Switchgear [M]. New Delhi: Tata McGraw - Hill Publication Company Limited, 2005.

[3] 胡毅,刘凯,吴田,等. 输电线路运行安全影响因素分析及防治措施[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3491-3499.

[4] 蒋乐,刘俊勇,魏震波,等. 基于马尔可夫链模型的输电线路运行状态及其风险评估[J]. 电力系统自动

化, 2015, 39(13): 51-57.

[5] 马志远,石立宝,姚良忠,等. 电网连锁故障的事故链搜索模型及策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3292-3302.

[6] Das, S., Santoso, S., Gaikwad, A., et al. Impedance - based Fault Location in Transmission Networks: Theory and Application [J]. IEEE Access, 2014, 2: 537-557.

[7] 郑涛,潘玉美,郭昆亚,等. 基于节点阻抗矩阵的配电网故障测距算法[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3233-3240.

[8] Mora - Flórez, J., Meléndez, J., Carrillo - Caicedo, G. Comparison of Impedance - based Fault Location Methods for Power Distribution Systems [J]. Electric Power System Research, 2008, 78(4): 657-666.

作者简介:

张铃珠(1988),女,硕士,工程师,主要从事输配电网规划评审及运行分析研究。(收稿日期:2020-07-12)

(上接第22页)

2) 单端接地电缆线路,出现直接接地线脱落时,会造成铝护套未有效接地。石墨层未有效接地时,石墨层上会产生很高的悬浮电压,进而导致石墨层对绝缘薄弱处高频充放电,并不断烧蚀外护套,引发火灾等严重后果。

3) 当电缆线路通过绝缘胶垫放置在金属支架时,石墨层未有效接地。为防止出现上述安全问题,电缆石墨层必须可靠接地,即110 kV以上高压单芯交流电缆,应采用可靠接地的金属支架,且电缆与支架、抱箍之间不应增加绝缘胶垫。

参考文献

[1] 王荣亮,王浩鸣,宗红宝,等. 高压电缆金属护套接地环流平衡抑制方法分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(11): 108-114.

[2] 张才军,全风云,陈佳,等. 主变空载合闸引起的电缆护层过电压分析[J]. 高压电器, 2019, 55(2): 164-170.

[3] 吴明祥,包建强,王建明,等. 一起220 kV电缆预制式中间接头击穿故障及其原因分析[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 95-97.

[4] 王谦,郝建,张电,等. 一交叉互联高压电缆绝缘故障的理论及仿真分析[J]. 高压电器, 2014, 50(9): 47-52.

[5] 陈根,唐焱,王新桥. 基于ATP的高压电缆金属护套多点接地故障仿真[J]. 高压电器, 2014, 50(4): 49-53.

[6] 段肖力,汤美云,林峰,等. 220 kV电缆中间接头主绝缘

击穿事故分析[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 142-144.

[7] 程序,陶诗洋,王文山. 一起110 kV XLPE电缆终端局放带电检测及解体分析实例[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(S1): 226-230.

[8] 曹俊平,蒋愉宽,王少华,等. XLPE电力电缆接头缺陷检测关键技术分析与展望[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 87-97.

[9] 方春华,李景,汤世祥,等. 基于接地电流的交叉互联箱故障诊断技术研究[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 16-23.

[10] 王永志,曹炜,梁海生,等. 电缆护套环流估算公式的拟合及排列方式的优化[J]. 高压电器, 2017, 53(1): 77-82.

[11] 陈贵. 基于电力电缆安全性的防火工艺应用与探讨[J]. 电工技术, 2018(6): 39-40.

[12] 姬康源,贾紫蕊. 电力电缆的防火技术措施探究[J]. 通信电源技术, 2018(1): 139-140.

[13] 吴俊鹏. 高压单芯电缆外护套烧蚀故障分析[J]. 集成电路应用, 2019, 36(2): 125-126.

[14] 严璋,朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

[15] 邱关源,罗先觉. 电路(第5版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[16] 电力工程电缆设计规范: GB 50217—2007[S], 2008.

作者简介:

刘云龙(1989),男,硕士,工程师,从事高压电缆、高电压与绝缘技术研究。

(收稿日期:2020-07-10)