

变电站入地故障电流对共站数据中心通信电缆的电磁影响研究

李永明¹, 刘 岩¹, 梁文辉¹, 汪小莞²

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;

2. 国网重庆市电力公司物资分公司, 重庆 400044)

摘要: 数据中心与变电站进行共站建设逐步成为解决数据中心占地及高耗能问题的一种有效方案。针对变电站故障时产生的地电位升高对数据中心的通信电缆造成影响的问题, 建立了电磁数值计算仿真模型, 分析了接地网在不同的连接方式下变电站与数据中心共站区域的地表电位、接触电压和跨步电压的分布情况。在此基础上, 确定接地网互联的布置方式, 研究故障电流引起的地电位升高对数据中心通信电缆的影响。最后通过计算发现增大接地网面积、改变土壤电阻率可以有效改善通信电缆中的转移电位差。

关键词: 变电站; 数据中心; 故障电流; 接地网; 通信电缆

Study of electromagnetic effects of substation ground fault currents on communication cables of co-located data centers

LI Yongming¹, LIU Yan¹, LIANG Wenhui¹, WANG Xiaowan²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Company Materials Branch, Chongqing 400044, China)

Abstract: The co-location construction of data centers and substations has gradually become an effective solution to solve the problems of data center occupancy and high energy consumption. To address the problem that the ground potential rise caused by substation faults affects the communication cables of data centers, an electromagnetic numerical calculation simulation model is established to analyze the distribution of ground potential, contact voltage and step voltage in the co-location area of substations and data centers under different connection methods of the grounding network. On this basis, the arrangement of the grounding network interconnection is determined and the effect of ground potential rise caused by fault current on the communication cables of the data center is studied. Finally, it is found that increasing the grounding network area and changing the soil resistivity can effectively improve the transfer potential difference in the communication cables through calculation.

Key words: substation; data center; fault current; grounding network; communication cable

0 引言

数据中心是汇集各类具有计算、存储和信息交互能力设备的区域^[1]。随着计算机技术和信息产业的蓬勃发展, 数据资源已成为至关重要的

生产要素, 分析和处理各类海量的数据需要构建大量的数据中心。但土地资源的限制以及高电能需求已经成为影响数据中心建设和运营的重要因素。有调查报告指出, 全球范围内服务器的电力

花费可能已经超过了服务器等硬件设备的花费^[2]。因此,一种有效的解决方案是数据中心与电力变电站共站建设。但以弱电为主的通信系统与高压变电系统能否共存、如何共存已成为影响发展的一个重要课题。

数据中心与变电站共站时,变电站侧发生工频短路,与变电站共站的数据中心机房可能的高压引入途径有两方面:一是数据中心机房进出通信局站缆线的感性耦合;二是通过变电站和数据中心共站的接地系统的阻性耦合^[3]。短路时数十千安的故障电流产生地电位升高及电位差,地电位升高不仅是引起接地网接触电位差和跨步电位差的来源,还会通过耦合作用对数据中心的通信电缆芯线施加一个转移电位,使数据系统的安全运行受到威胁。国内曾多次出现过因地电位升高造成通信设备损坏的事故。如上海某变电所由于220 kV主变压器单相接地引起地电位升高,并对通信设备形成反击,造成3个变电所通信中断达2 h^[4]。地电位升高不仅可能对通信设备造成损害,而且可能造成人身伤亡,因此有必要采取一定的措施加以预防。

现阶段国内外对此做了大量的研究工作,提出了关于变电站与数据中心建设防护的多种建议。文献[3]提出在数据中心建设时,需要控制数据中心信息设备与电抗器的距离大于10 m,与电容器的距离大于5 m;控制数据中心信息设备与高压母线的距离大于10 m,以确保数据中心信息设备承受的稳态持续工频磁场强度在允许范围内。文献[5]提出将故障切除时间从保守的3 s缩短到100 ms,人身允许的接触电压和跨步电压可提高4.48倍,线缆、二次设备、微机保护装置和计算机的绝缘耐受电压至少提高24.4%。文献[6]从地电位升高、接地情况和电磁场环境等几个方面探讨高压变电站对数据中心的电磁干扰,并提出解决方案。文献[7]建议提高信息存储设备的工频磁场抗扰度,取消数据中心的工频磁场屏蔽措施,为数据中心的工频磁场防护策略节省大量屏蔽费用。文献[8]的研究结果表明,高压变电站接地系统的设计在很大程度上取决于

变电站所在地土壤的性质和电阻率。

接地网是具有泄流和均压作用的较大型水平网状接地装置,在电力系统发生接地故障时能快速泄放故障电流,保障了电力系统的安全可靠运行及人员安全^[9-11]。但对数据中心和变电站共站接地网的相关问题研究鲜有文章发表。为此本文根据《国家电网有限公司变电站与数据中心站融合设计通用方案》,以220 kV变电站为例,通过建立接地网模型,研究变电站发生短路时,接地网连接方式、接地网面积和土壤电阻率等多种因素对数据中心通信电缆转移电位差大小的影响,为共站区域通信电缆布线和防护提供参考建议。

1 仿真计算模型

数据中心对地电位的均匀性要求很高,但是实际的共站建设中很难做到与变电站使用同一个接地系统,而且大面积接地网成本巨大。本文通过数据中心和变电站分别建有接地网,通过研究两个接地网不同连接方式变电站与数据中心共站区域的电位分布特性,提出有效的均压措施。

1.1 接地网的分离与互联模型

本文采用CDEGS软件建立模型并计算分析^[12]。在CDEGS软件中分别搭建接地网的分离布置模型和接地网互联布置模型,如图1所示。接地网的形状对本文研究的影响不大,因此在建模时均简化为矩形形状。接地网范围与建筑区域重叠,设置变电站接地网面积为100 m×60 m,数据中心接地网面积为30 m×60 m。接地网材料均为镀锌钢,两接地网的埋深均为0.8 m,场地土壤电阻率为100 Ω·m的均匀单层土壤。

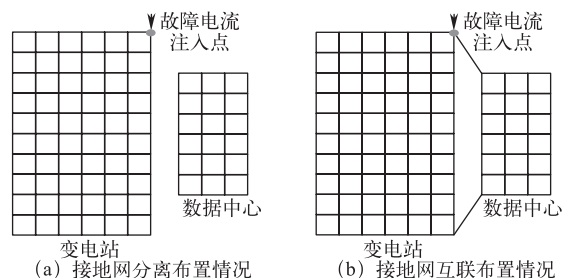


图1 接地网连接方式对比

Fig. 1 Comparison of ground grid connection modes

1.2 故障电流计算

根据标准《交流电气装置的接地》^[13], 在变电站内发生接地短路故障情况时, 流入接地网的电流可按照式(1)和式(2)计算

$$I = (I_{\max} - I_n)(1 - K_{e1}) \quad (1)$$

$$I = I_n(1 - K_{e2}) \quad (2)$$

式中, I 为接地短路故障电流; $I_{\max}$ 为最大接地短路电流, 对于本文研究的220 kV变电站取值为20 kA; I_n 为发生最大接地短路电流时的中性点环流, I_n 为15% $I_{\max}$, 则 $I_n=3\,000$ A; K_{e1} 为短路时所有避雷线工频分流系数, 取值为0.426 3; K_{e2} 为外短路时所有避雷线工频分流系数, 取值为0.147 2。

根据规程要求, 接地短路故障电流取式(1)和式(2)两者的最大值。则计算用的接地短路故障电流为

$$I = (I_{\max} - I_n)(1 - K_{e1}) = 9\,752.9 \text{ A} \quad (3)$$

设置故障电流从变电站接地网的右上角注入, 分别计算接地网在不同连接方式下注入的故障电流引起的地表电位、接触电压和跨步电压分布情况。

2 接地网分离与互联布置比较分析

2.1 接触电压分布分析

接触电压是变电站人身安全的重要保障, 同时也是接地系统人身安全的决定性因素^[14]。接地网相互隔离和通过铜导体相连的情况下, 共站区域接触电压分布情况如图2所示。变电站短路故障下共站区域接触电压最值点见表1。

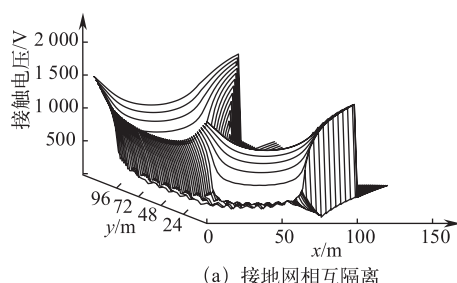
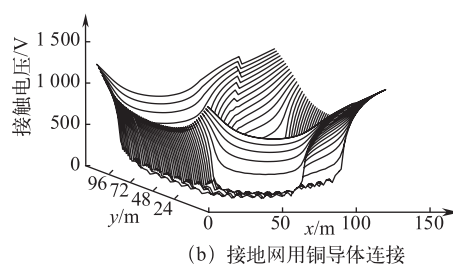


图2 故障情况下共站区域内接触电压分布情况

Fig. 2 Contact voltage distribution in the co-station area under fault conditions

表1 变电站短路故障下共站区域接触电压最值点

Tab. 1 The maximum surface potential in the co-station area under the short-circuit fault of the substation

连接方式	最值点	坐标	地表电位最大值/V
相互隔离	最大值	(-26, 60, 0)	1 887.3
相互隔离	最小值	(22, -18, 0)	1.426 6
铜导体连接	最大值	(50, -60, 0)	1 472.7
铜导体连接	最小值	(-20, -6, 0)	44.148

由表1可知, 两个接地网分离布置时, 共站区域接触电压最大值为1 887.3 V, 最小值为1.426 6 V。采用铜导体连接后, 共站区域地表电位最大值为1 472.7 V, 最小值为44.148 V, 此时共站区域内的最大接触电压下降了21.96%。

2.2 跨步电压分布分析

接地网相互隔离和通过铜导体相连的情况下, 共站区域跨步电压分布情况如图3所示。

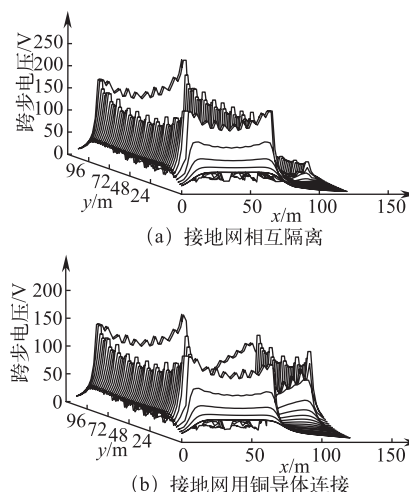


图3 故障情况下共站区域跨步电压分布情况

Fig. 3 Step voltage distribution in the co-station area under fault condition

从图3可知,当接地网分离布置时,跨步电压较大值位于变电站接地网边界位置。变电站区域与数据中心区域跨步电压的差距非常大。采用铜导体连接后,两区域相邻处的跨步电压值明显下降。整个共站区域跨步电压的分布更加均衡。共站区域跨步电压最值点见表2。

表2 变电站短路故障下共站区域跨步电压最值点

Tab. 2 The maximum surface potential in the co-station area under the short-circuit fault of the substation

连接方式	最值点	坐标	地表电位最大值/V
相互隔离	最大值	(0,50,0)	227.63
相互隔离	最小值	(26,16,0)	3.303 5
铜导体连接	最大值	(0,50,0)	168.30
铜导体连接	最小值	(-32,-2,0)	8.895 6

由表2可知,两个接地网分离布置时,共站区域接触电压最大值为227.63 V,最小值为3.303 5 V。采用铜导体连接后,共站区域地表电位最大值为168.30 V,最小值为8.895 6 V。采用铜导体对接地网进行连接后,共站区域内的最大跨步电压下降了26.06%。

2.3 地表电位分析

接地网相互隔离和通过铜导体相连的情况下,共站区域地表电位的分布情况如图4所示。

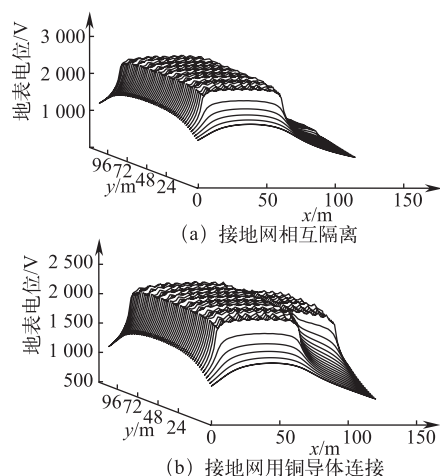


图4 变电站短路故障下共站区域地表电位分布

Fig.4 Surface potential distribution in the co-station area under fault conditions

由图4可知,当两个接地网相互隔离时,变电站内的故障电流对数据中心地表电位的影响较

小。在单个接地网区域内,地表电位分布的非常均匀。但是在接地网和接地网之间的间隙处,地表电位出现明显的下降。当两个接地网通过导体相连时,整个共站区域的地表电位分布均匀。对共站区域接地系统安全造成威胁的主要因素不是绝对的地电位升高,而是地电位差。所以采用铜导体对接地网进行连接,使整个场区的电压分布更加均衡。共站区域地表电位最值点见表3。

表3 变电站短路故障下共站区域地表电位最值点

Tab. 3 The maximum surface potential in the co-station area under the short-circuit fault of the substation

连接方式	最值点	坐标	地表电位最大值/V
相互隔离	最大值	(-20,28,0)	2 792.6
相互隔离	最小值	(50,60,0)	830.69
铜导体连接	最大值	(-20,28,0)	2 411.7
铜导体连接	最小值	(50,-60,0)	940.43

根据表3可知,当两个接地网分离设置时,共站区域地表电位最大值为2 792.6 V,最小值为830.69 V。采用铜导体连接接地网后,共站区域地表电位最大值为2 411.7 V,最小值为940.43 V。采取铜导体连接接地网后,两点间的最大电位差下降了490.64 V。

综上所述,将数据中心与变电站的接地网采用铜导体连接起来,可以使整个共站区域的地表电位分布得更加均匀,跨步电压、接触电压明显下降。

为了进一步探究连接方式对接地网性能的影响,保持其他参数不变,依次设置变电站和数据中心之间连接导体的数目为2、4、6和8根,计算该情况下地表电位、接触电压和跨步电压的最大值,计算结果见表4。

表4 连接导体的数量对接地网特性参数的影响

Tab. 4 Influence of the number of connected conductors on the characteristic parameters of the ground grid

连接导体数量/根	最大地表电位/V	最大接触电压/V	最大跨步电压/V
2	5 005.3	2 901.7	397.62
4	5 002.6	2 900.1	397.14
6	5 001.4	2 898.2	396.45
8	5 000.8	2 897.7	396.12

由表4可知,保持其他条件完全一致时,增加连接导体的数量,对整个共站场区的地表电

位、最大接触电压和最大跨步电压的值几乎没有影响。

3 互联下故障电流引起的地电位升高对数据中心通信电缆的电磁影响

3.1 铠装通信电缆转移电位差理论分析

转移电位是指当短路电流或雷电过电流流过接地装置时,一端与接地装置连接的金属导体传递接地装置对地的电位。转移电位导致的转移电位差是破坏设备的关键因素。如在变电站受到雷击或发生短路故障情况下,电缆芯线与屏蔽层之间会产生巨大的转移电位差。这种电位差一方面可能会破坏电缆的主绝缘,形成电树枝或介质击穿;另一方面转移电位差在铠装层形成回路,产生很大的暂态电流,干扰通信设备,导致设备误操作^[15-16]。分析受到变电站地电位升高产生的影响时,通信电缆末端产生的电位差对完善数据中心通信电缆布线和接地系统优化有重要意义。

图2~图4和表4的结果表明,当变电站与数据中心共站建设时,接地网之间的连接能够对系统的稳定运行起到重要的作用,且连接的导体的数目对共站区域几乎没有影响。为此在后续的研究中,变电站和数据中心之间采用两根铜导体连接。通信电缆、变电站和数据中心的相对位置关系如图5所示。

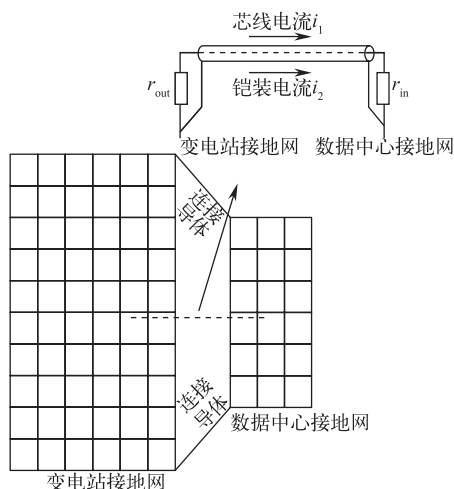


图5 变电站、电缆、数据中心相对位置关系

Fig. 5 Relative location of substations, cables, and data centers

如图5中, i_{ch} 表示流入接地网故障电流; i_1 表示流过电缆芯线的电流; i_2 表示流经电缆铠装的电流; r_1 表示电缆芯线每米长度的电阻值; r_2 表示电缆铠装每米长度的电阻值; r_{in} 表示电缆芯线在中央控制室内连接设备的等效输入电阻; r_{out} 表示电缆芯线在站场一次侧连接检测设备的等效输出电阻。文献[17]进行了铠装电缆转移电位差的相关研究,当芯线接于接地网时,转移电位差计算公式为

$$\Delta V = i_2 r_2 d - i_1 (r_1 d + r_{in}) - \left(\frac{\mu_0 d}{8\pi} + \frac{\mu_0 d}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \frac{di_1}{dt} \quad (4)$$

经分析可知,铠装电缆外皮电流 i_2 、电缆芯线电流 i_1 和电缆长度 d 等因素都会影响转移电位差 ΔV 的幅值。而流经电缆的铠装电流 i_2 是由短路故障电流经接地网分流后获得的,由于接地网的拓扑结构不同,当故障电流从不同位置注入时,短时间内电流只在注入点附近的一定有效区域内散流,而非由整个接地网向外散流,故障电流的注入位置不同,接地网的散流性也会不同^[18]。此外,故障电流除含有工频分量外,还包括持续时间较短、幅值较大和频谱较宽的高频暂态分量,在设计中还需要考虑高频暂态分量对转移电位差的影响。

接地电阻是衡量接地状态是否良好的参数,反映了接地网的规模,同时土壤电阻率是决定接地体电阻的重要因素,因此为了合理设计接地装置,还应考虑接地网面积和土壤电阻率的大小。

本文借助CDEGS软件仿真分析故障电流、接地网和土壤电阻率等参数对转移电位差的影响情况。

3.2 故障电流—接地网—通信电缆仿真模型

CDEGS仿真模型如图6所示。电缆型号为PTYL23-12,总长度50 m,变电站接地网面积为100 m×60 m,数据中心接地网面积为60 m×30 m,两个接地网相距10 m,土壤为均匀单层土壤,电阻率为100 Ω·m,两接地网埋深均为0.8 m,电缆布置于接地网中间靠上的位置。

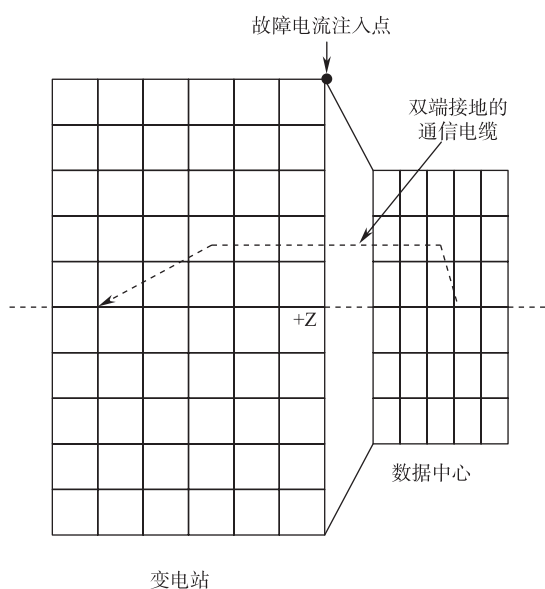


图6 CDEGS 仿真模型

Fig. 5 CDEGS imulation model

3.2.1 改变故障电流注入点位置

通过理论分析可知,不同故障电流注入位置会直接影响到流经铠装的电流值,进而影响转移电位差的幅值。保持其他因素不变,只改变故障电流的注入位置,考虑水平和竖直两个方向,按照如图7所示的位置从点①到点⑥依次注入故障电流,探究故障电流注入点位置对数据中心通信电缆转移电位差的影响。

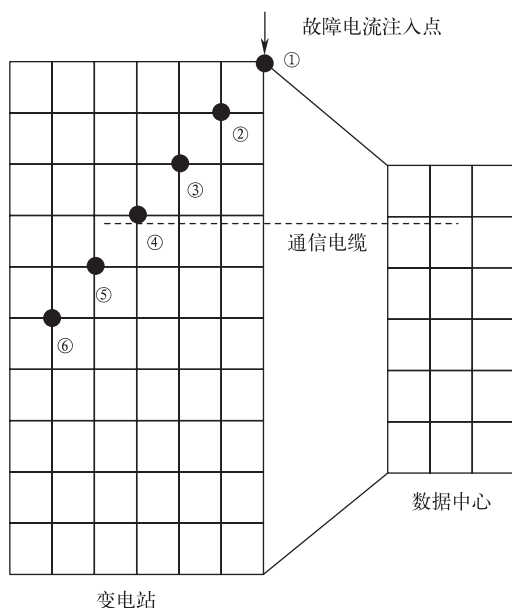


图7 注入点位置

Fig. 7 Position of injection point

注入位置对数据中心通信电缆转移电位差的影响计算结果如图8所示。

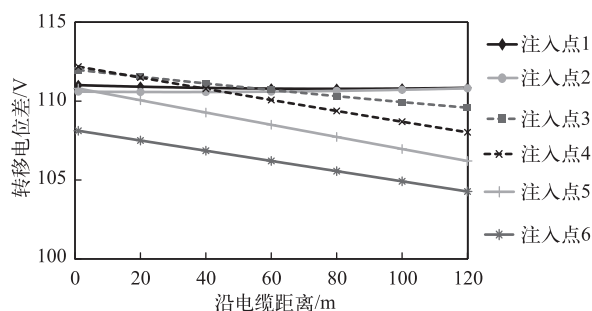


图8 故障电流注入点对通信电缆转移电位差的影响

Fig. 8 Influence of fault current injection point on transfer potential difference of communication cable

由图8可以看出,当短路电流注入位置距离通信电缆很近时,即点①、点②和点③处,电流在电缆所在处能够快速分散,电缆所处位置的电位分布也比较均匀,此时注入位置对电缆转移电位差的影响很小。当电流注入位置距离电缆较远时,电缆两端出现较大的电位差。

3.2.2 改变故障电流频率

依次取10 kA,频率分别为50 Hz、500 Hz、1 000 Hz、1 500 Hz、2 000 Hz和2 500 Hz的故障电流从接地网右上方边角处注入,探究高频暂态分量故障电流的频率对通信电缆转移电位的影响,所得的结果如图9所示。

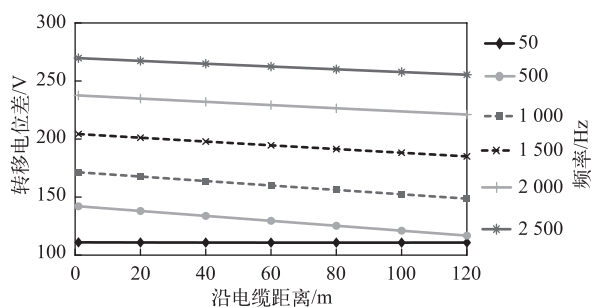


图9 故障电流频率对通信电缆转移电位差的影响

Fig. 9 Influence of fault current frequency on transfer potential difference of communication cable

由图9可以看出,在频率较低时,土壤对电流的阻碍作用远远大于金属,从而使电流能够从整个接地网向土壤中均匀泄漏,这使得在接地网上方,关于接地网中心或任意中心轴对称位置的地电位升高基本一致。随着入地电流频率的增

加,导体由于趋肤效应,散流能力降低,造成接地网表面出现较大的电位差,也使通信电缆上的转移电位增大,且频率越大影响越剧烈。

3.2.3 改变共站数据中心侧接地网面积

本文着重分析与变电站共站建设的数据中心侧接地网相关参数。保持其他影响因素不变,改变数据中心侧接地网的面积,可以得到数据中心处接地网面积对通信电缆转移电位差的影响情况,如图10所示。

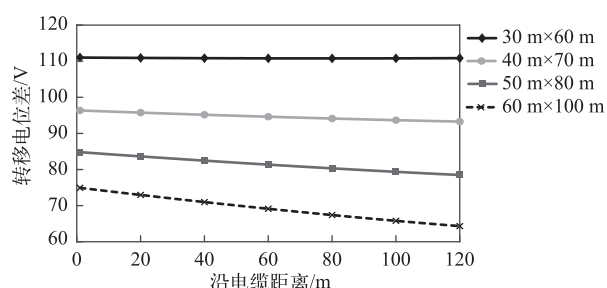


图 10 数据中心地网面积对通信电缆转移电位差的影响

Fig. 10 Influence of ground network area of data center on transfer potential difference of communication cable

由图10可以看出,接地网的面积对通信电缆转移电位差的影响比较明显。随着接地网面积的增加,接地网的接地电阻减小,接地网的散流能力进一步增强。最终,电缆的转移电位差相应减小。

3.2.4 改变共站区域土壤电阻率

保持其他影响因素不变,分别取土壤电阻率为 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ 、 $200\ \Omega\cdot\text{m}$ 、 $300\ \Omega\cdot\text{m}$ 、 $400\ \Omega\cdot\text{m}$ 、 $500\ \Omega\cdot\text{m}$ 和 $600\ \Omega\cdot\text{m}$,探究土壤电阻率对通信电缆转移电位差的影响,如图11所示。

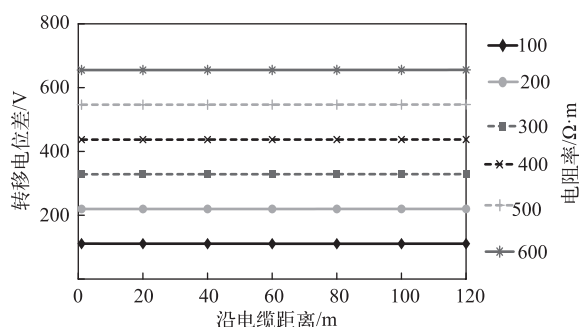


图 11 土壤电阻率对通信电缆转移电位差的影响

Fig. 11 Influence of soil resistivity on transfer potential difference of communication cable

由图11可以看出,随着土壤电阻率的增大,转移电位差近似以正比例上升。这是因为随着土壤电阻率逐渐升高,故障电流的散流会变得愈加困难。最终,接地网整体电位将伴随接地电阻的升高而升高,导致接地网内的电压不平衡度逐渐加剧,转移电位差进一步增大。

4 结束语

随着电力系统的发展,在变电站接地网设计中应着重考虑转移电位对人身安全和设备的影响,为此建立电磁仿真模型,探究变电站接地故障电流对数据中心通信电缆的影响。

1) 首先确定变电站与数据中心的连接方式。通过计算可知,当数据中心接地网与变电站接地网通过导体连接进行联合布置时,能够使共站区域内的地电位分布更均匀,同时有效降低共站区域的接触电压以及跨步电压的幅值。在本例中,最大接触电压下降了21.96%,最大跨步电压下降了26.06%。

2) 当确定数据中心与变电站接地网联合布置时,通过计算发现,增大接地网面积、改变土壤电阻率都可以有效改善数据中心通信电缆中的转移电位差。针对前者,可以通过架设双层接地网或连接站外辅助接地网来增大接地网的面积、减小接地网的接地电阻,从而缓解地电位升高对电缆的干扰。针对土壤电阻率,可以通过人工接地坑内回填粘土、降阻剂等方法来降低土壤电阻率,帮助接地电流快速扩散。

参考文献

- [1] 庞志鹏. 绿色节能模块化数据中心建立分析[J]. 低碳世界, 2021, 11(12): 190-191.
- [2] 郁善金. 智能电网环境下基于价格的数据中心电力成本优化[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [3] 张波, 何金良, 刘吉克, 等. 云数据中心与高压变电站共站时的工频磁场环境特征[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3812-3820.
- [4] 韩树奎. 接地装置地电位升高对地埋通信电缆的

- 影响及防护[J]. 吉林电力, 2005(4): 1-3.
- [5] 何金良, 刘吉克, 祁征, 等. 云数据中心与变电站共站时工频短路故障主动防护策略[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 4158-4167.
- [6] 林庚, 祁征, 于昕. 高压变电站与数据中心共站的工频电磁影响与防护[J]. 邮电设计技术, 2017(12): 81-84.
- [7] JIKE L, XINGHAI Z, JINLIANG H, et al. Research and test on immunity of a data center server against power frequency magnetic fields in a high voltage substation [C]. 2015 7th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM), 2015: 440-446.
- [8] AHMAD SHUKRI A, KAMAL, YANUAR Z, et al. A systematic approach to safe and effective earthing system design for high voltage substation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2016(818): 146-150.
- [9] 薛雯娟. 大型接地网安全性及接地阻抗测量案例分析[J]. 电气时代, 2022(1): 81-82, 86.
- [10] 张波, 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术现状及展望[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2569-2582.
- [11] 接地系统的接地电阻率, 接地阻抗及地表电位测量的IEEE指南: IEEE 81—2012 [S].
- [12] 王小凤. CDEGS软件在电力系统中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [13] 交流电气装置的接地: DL/T 621—1997 [S].
- [14] 杨占胜. 短路时变电站接地系统安全性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [15] 焦超群, 李琳, 赵志斌, 等. 电力电缆短路故障时通信线上感应电压的计算[J]. 华北电力大学学报, 2003(2): 25-29.
- [16] 潘怡林. 高速铁路线路综合接地系统故障诊断研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [17] 陈立, 廖家俊, 曹晓斌, 等. 变电站对地短路时接地网转移电位差对铠装电缆影响的研究[J]. 高压电器, 2014, 50(10): 43-48, 55.
- [18] 司马文霞, 李晓丽, 袁涛, 等. 不同结构土壤中接地网冲击特性的测量与分析[J]. 高电压技术, 2008(7): 1342-1346.

作者简介

李永明（1964—），男，博士，副教授，研究方向为电磁场数值计算、电力系统电磁兼容及环境保护等。

刘岩（1996—），女，硕士研究生，研究方向为电磁场数值计算。

（收稿日期：2022-06-09）

变电站入地故障电流对共站数据中心通信电缆的电磁影响

研究 P47

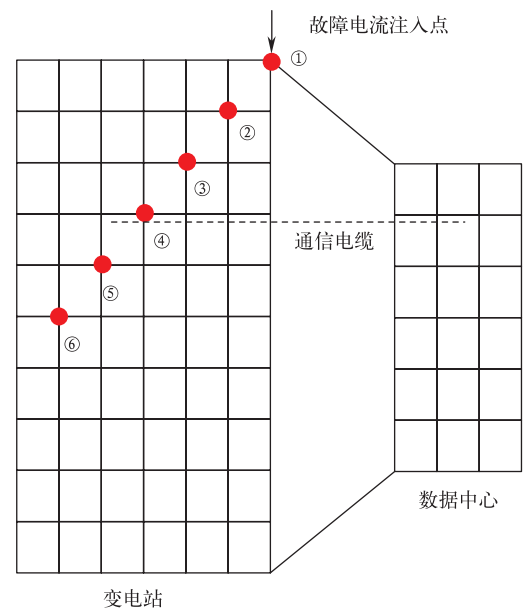


图 7 注入点位置
Fig. 7 Position of injection point

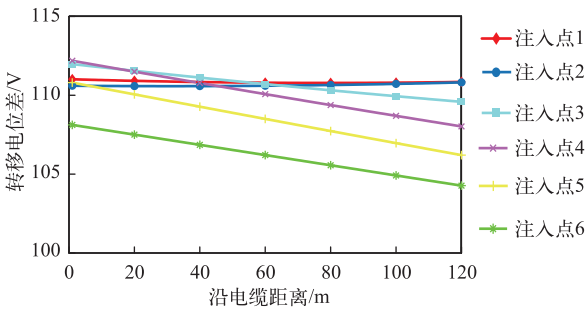


图 8 故障电流注入点对通信电缆转移电位差的影响
Fig. 8 Influence of fault current injection point on transfer potential difference of communication cable

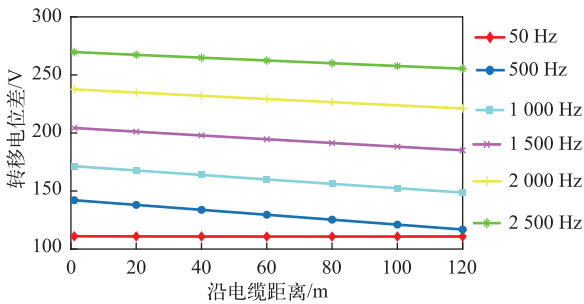


图 9 故障电流频率对通信电缆转移电位差的影响
Fig. 9 Influence of fault current frequency on transfer potential difference of communication cable

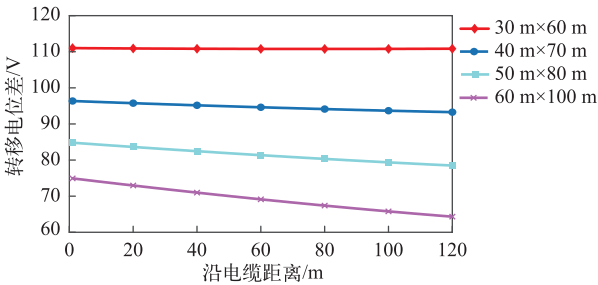


图 10 数据中心地网面积对通信电缆转移电位差的影响
Fig. 10 Influence of ground network area of data center on transfer potential difference of communication cable