

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.01.011

基于 EPANET 的变电站水消防系统数值模拟

欧庆和¹, 尹晓峰¹, 任卫明¹, 牛梦娇¹, 郭帅², 袁守军²

(1. 国网安徽省电力有限公司蚌埠供电公司, 安徽 蚌埠 233000; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:新建的市区变电站大多采用布置紧凑、占地面积较小的全户内型变电站,其消防系统通常不建设消防水池,直接从市政管网取水灭火。文章研究该模式下的消防系统运行现状及供水可靠性,以管网中节点的自由水压为参数,采用国际通用的有压管网数值模拟软件 EPANET,构建区域管网数值模型,对室内消火栓开启、室外消火栓开启和室内外消火栓同时开启 3 种工况进行数值模拟分析。结果表明:变电站消防系统开启后,市政管网各节点水压整体降低,少量节点水压低于 28 mH₂O,且邻近变电站的节点水压降低幅度大于其他节点;采用 2 路市政供水干管向变电站消防系统供水,可显著提高变电站消防系统的供水可靠性。研究结果可为典型户内变电站消防系统的设计提供理论依据。

关键词:户内变电站;消防系统;数值模拟;EPANET 软件

中图分类号:TU991.32 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)01-0067-06

Numerical simulation of substation water firefighting system based on EPANET

OU Qinghe¹, YIN Xiaofeng¹, REN Weiming¹, NIU Mengjiao¹, GUO Shuai², YUAN Shoujun²

(1. Bengbu Power Supply Company of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Bengbu 233000, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Most of the newly-built urban substations are indoor ones with compact layout and small floor area. Their firefighting systems usually take water from the municipal pipe network directly to put out fire instead of building new fire pools. In this paper, the operation status and water supply reliability of the firefighting system under this mode was studied. With the free water pressure of the nodes in the pipe network as the parameter, the international general pressure pipe network numerical simulation software EPANET was used to build the regional pipe network numerical model, and the numerical simulation analysis was carried out for the three working conditions of indoor fire hydrant opening, outdoor fire hydrant opening, and indoor and outdoor fire hydrant opening at the same time. The results showed that after the substation firefighting system was started, the water pressure at each node of the municipal pipe network decreased as a whole, and the water pressure at a few nodes was lower than 28 mH₂O, and the decrease in water pressure at the nodes adjacent to the substation was greater than that at other nodes. The water supply reliability of the substation firefighting system was significantly improved through supplying water from two water supply mains simultaneously. The research results can provide theoretical basis for the design of typical indoor substation firefighting system.

Key words: indoor substation; firefighting system; numerical simulation; EPANET software

收稿日期:2021-08-23;修回日期:2021-11-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878232);国家电网供电公司科技资助项目(JFTP-1925707990)

作者简介:欧庆和(1963—),男,江苏南京人,国网安徽省电力有限公司蚌埠供电公司高级工程师;

袁守军(1976—),男,江苏盐城人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:sjyuan@hfut.edu.cn.

随着城市化建设的推进,城镇对电力的需求日益提高,较多城市在市区或近郊建立变电站,以满足城镇居民及交通、供水、污水处理等各类市政公用设施的用电需求。由于市区人口稠密、征地困难,变电站的建设通常采用占地少、布置紧凑的户内变电站(如武汉市三环内均为户内站)^[1]。近年来,随着市区变电站数量日益增多,其消防安全日益受到关注。

在传统的变电站水消防系统设计中,通常在变电站内建设 1 座消防水池,一旦发生火灾,变电站的消防系统从消防水池中取水灭火^[2]。该消防系统具有安全、可靠的优点;但消防水池占地面积较大,导致部分市区变电站在选址和征地方面面临较大困难。如何减小市区变电站的建筑面积,并保障变电站消防安全,成为亟待解决的问题。针对此问题,一些研究者提出在土建形式上进行改变,如采用地下式消防水池^[3]或全地下变电站消防系统^[4],但这些方法都存在一定的弊端,如安装和检修较困难、安全隐患较大等。也有研究者提出可以通过不设置消防水池^[5],以减少占地面积,但对于此种方法的可行性研究很少。

本文以某市区内 110 kV 户内变电站消防系统为例,采用 EPANET2.0 软件构建数值模型,研究变电站消防系统从市政管网直接取水的可行性。

建在市区的变电站,电压等级通常不大于 110 kV,如 110、35、10 kV 等。110 kV 变电站的建筑体积超过 5 000 m³,依据文献^[6],其配电装置室属丙类厂房,耐火等级为一级,应设置消火栓给水系统,包括室内消火栓系统和室外消火栓系统。在传统 110 kV 变电站的水消防系统中,站内通常会建造 1 座占地近 300 m² 的消防水池,以保障消火栓系统的供水安全。

根据文献^[7],具备条件的城市变电站的消防设施可从市政管网中取水,用于变电站内的消防给水。近年来,随着城市化建设推进,城镇供水设施得到进一步完善。北京、上海、广州等城市的新建户内变电站取消了消防水池,其变电站消防用水直接从市政管网中取水。这种从市政管网直接取水的消防设计方案,存在以下 2 个关键问题值得深入研究:在城镇居民用水高峰期间,变电站消火栓系统是否能从管网中取用到足够的消防用水? 变电站发生消防用水时,对市政管网中各用水节点的压力与流量的影响如何,是否会严重影响周围居民的用水需求?

由于消防设施的触发及启动频次极低,变电

站消防取水过程仅在突发火灾时才发生,目前该类灭火系统的实际运行数据非常缺乏,相关文献报道很少。因此,构建城市市政管网水力模型,开展变电站消防工况下的数值模拟研究与分析,对保障变电站消防安全、完善消防设计及运行数据具有重要意义。

1 数值模拟原理与方法

在有压管网系统水力计算中,通常将管网系统中参与水流输配的各个物理实体抽象简化为节点和管段,利用能量平衡与质量守恒原理,分别建立连续性方程和能量守恒方程,将其联立可得到相应的方程组。其中,依据克契霍夫第一定律,可列出节点的连续性方程,即

$$\sum q_{ij} + Q_i = 0 \quad (1)$$

其中: i, j 为在基环 k 中的相邻节点; q_{ij} 为连接节点 i, j 的管段流量; Q_i 为节点 i 的流量。而管网系统中,各节点水压与水头损失的关系可采用管段的水头压降公式描述,即

$$H_i - H_j = h_{ij} = s_{ij} q_{ij}^n \quad (2)$$

其中: H_i 为节点 i 的水压高程; h_{ij} 为从节点 i 到节点 j 的管段水头损失; s_{ij} 为管段的摩阻; n 为流量指数,一般取值为 1.852~2.000。

对于供水管网系统,可依据克契霍夫第二定律,列出闭合环的能量平衡方程,即

$$\sum h_{ij} - \Delta H_k = 0 \quad (3)$$

其中, ΔH_k 为基环 k 环路中的增压或减压装置产生的水头差。

对于未连接成环的枝状管网系统,只需联立求解(1)式、(2)式,而对于闭合的环状管网系统,还必须求解环方程(3)式。环方程的求解工作量巨大,通常需借助软件进行计算。

EPANET 软件是目前有压管网系统水力建模与分析计算领域中最常用的软件^[8-9]。典型的 EPANET 模型物理构成如图 1 所示。该软件将有压管道系统模拟为相互关联的管段和节点集合,管段上可设置水泵和控制阀门,连接节点代表管段连接点、供水水库或蓄水池。与传统的水力计算方法相比,EPANET 模型计算精度高,并可实现对火灾的动态模拟与演示。本文以某市为例,采用 EPANET 2.0 构建数值模型,分析不利供水条件下(供水高峰时段),变电站消防系统从市政管网直接取水时消防用水对供水管网的影响,研究管网模型中各节点处的压力变化特征。

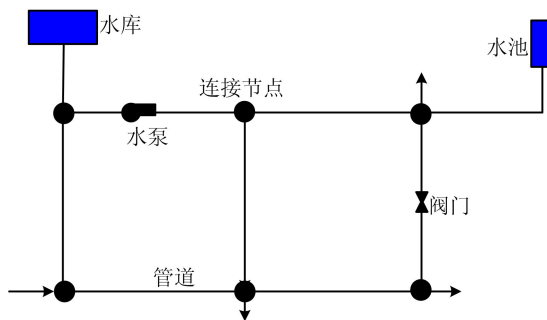


图 1 EPANET 模型物理构成示意图

2 工程实例数值模型构建

该市某区的供水管网模型布置如图 2 所示(数字代表节点的编号),中心地段的管网采用环状布置,区域周边管网布置成树状。管网模型基本信息为:模型共有 105 个节点,包含 2 个供水水源点、2 个水泵和 3 个高位水池(编号为 1、2、3);区域内共有 127 根管段,管段总长为 66.3 km;在管网末梢区域,有 110 kV 户内变电站 1 座(节点 4)。

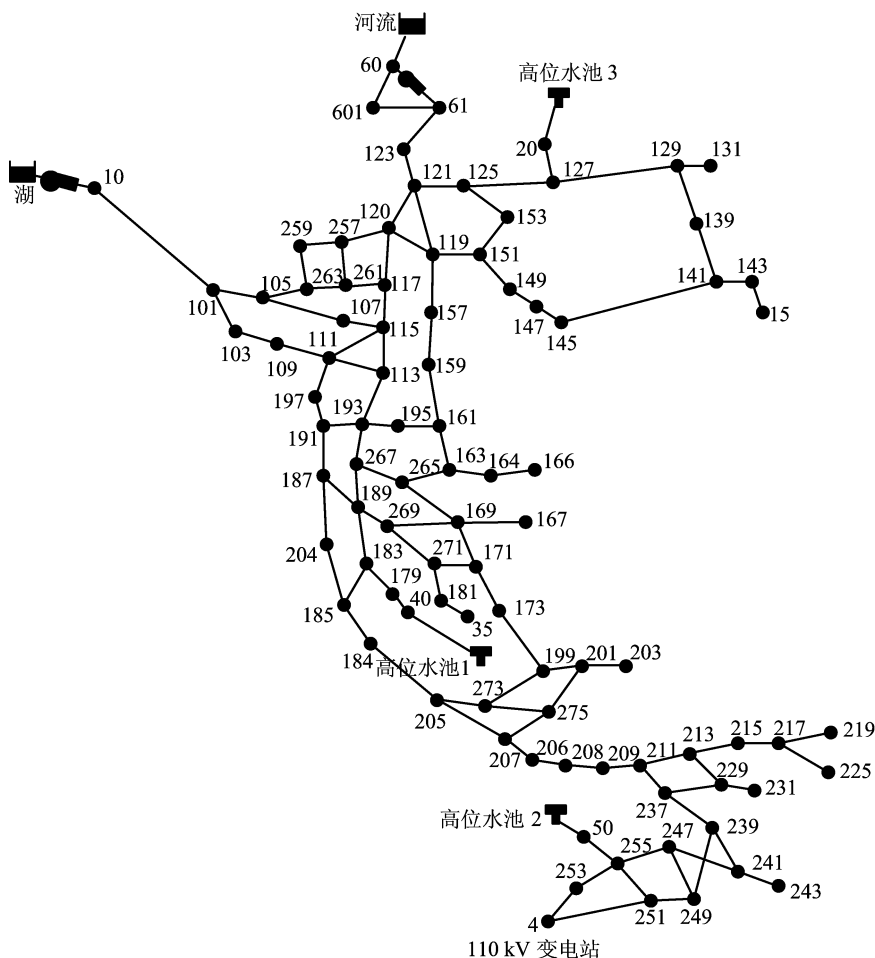


图 2 工程实例供水管网模型

若模型参数与实际数据不一致,则会影响建模结果的准确性。因此,在建模过程中,水泵的流量扬程曲线、管长、管径、节点的标高和基本需水量等参数均根据实际情况进行设置,并根据管径、管材及敷设年代等情况,对管道进行分组,参考经验值^[10],每组使用相同的粗糙系数。

该区域用水量变化曲线如图 3 所示。该区域最高日用水量为 $6.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;用水高峰时段为 21:00—22:00,用水量为 $3\ 202.24 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

依据文献[6],110 kV 户内变电站设计消防

用水量如下:在火灾延续时间为 3.0 h 下,室内、外消火栓单位时间用水量分别为 20、25 L/s,消防总用水量分别为 216、270 m^3 。

按照最不利供水工况开展消防模拟。

假设变电站发生火灾的时间段为用水高峰时段,火灾持续时间为 3 h(19:00—22:00),水力模拟时间步长为 1 h,当室内、外消火栓分别开启时,单位时间消防用水量分别为 20、25 L/s,当室内、外消火栓同时开启时,单位时间消防用水量为 45 L/s。

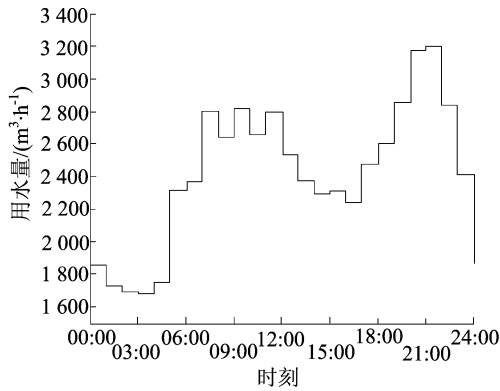


图 3 工程实例供水管网模型 24 h 用水量变化曲线

3 数值模拟结果与分析

依据文献[11],城市配水管网的供水水压宜满足用户接管点处服务水压 28 mH₂O 的要求。按照此要求,对 4 种模拟工况下各节点的水压进行统计分析,结果见表 1 所列。

21:00—22:00 室内消火栓启动时管网中各节点压力分布如图 4 所示。

3 种消防工况条件下,自由水压小于 28 mH₂O 节点水压随时间变化曲线如图 5 所示。

表 1 用水高峰时段 4 种模拟工况下管网节点压力统计结果

火灾工况	3 种水压下节点数			管网节点压力/mH ₂ O	
	<28 mH ₂ O	28~40 mH ₂ O	40~50 mH ₂ O	最大	最小
无火灾	3(101,103,153)	56	28	46.80	24.90
室内消火栓开启	4(101,103,153,253)	56	27	46.71	24.80
室外消火栓开启	5(101,103,153,253,4)	55	27	46.69	24.77
室内、外消火栓同时开启	5(101,103,153,253,4)	57	25	46.61	24.67

注:括号中数字为节点编号。

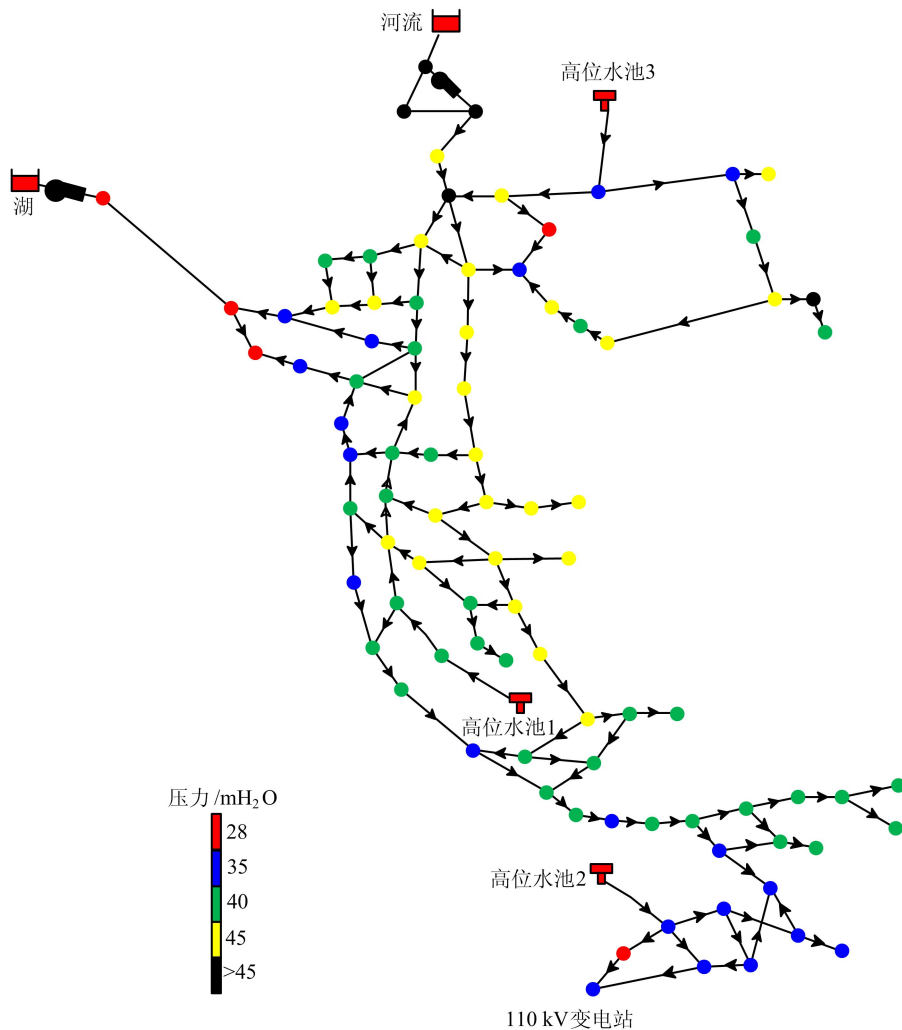
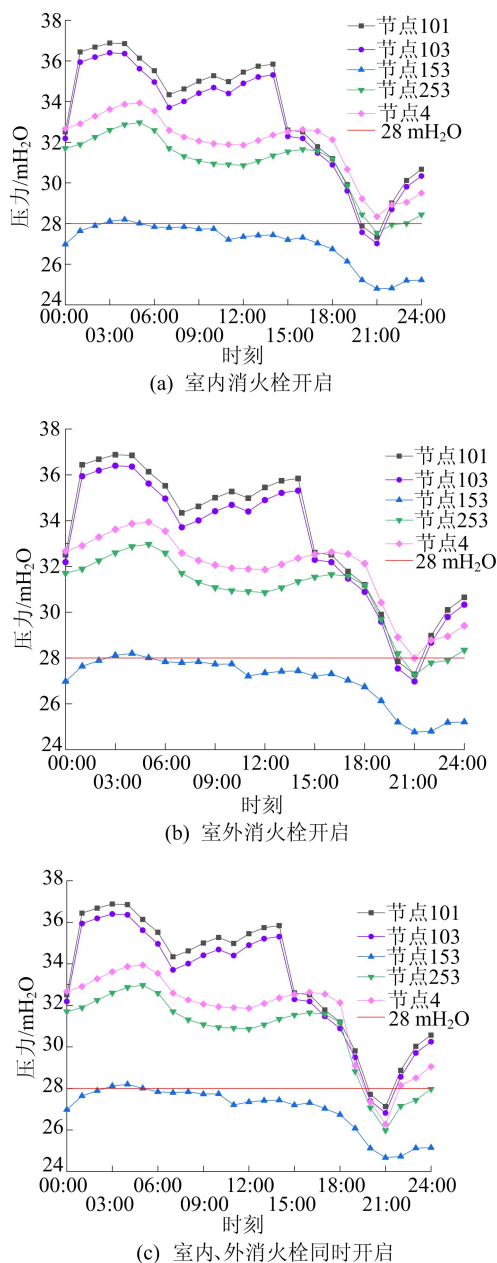


图 4 21:00—22:00 室内消火栓启动时管网中各节点压力分布

图 5 水压小于 $28 \text{ mH}_2\text{O}$ 节点的 24 h 压力变化曲线

3.1 室内或室外消火栓启动时消防工况分析

由表 1 可知,当变电站无火灾发生时,供水管网系统节点压力状况总体良好,仅在用水高峰时段,节点 101、103、153 处的水压小于 $28 \text{ mH}_2\text{O}$ 。在市政供水管网设计中,设计人员须进行用水高峰时段水力计算和校核,通过调整管径、流速等参数,确保供水管网满足用户对流量和水压等指标的需求^[12]。由于市政供水情况较为复杂,对于长期运行的市政管网,可能因腐蚀、结垢或流量变化等因素造成部分区域(节点)的水压损失偏大,出现节点水压偏低的现象。

当发生初期局部火灾时,依据现场实际情况,变电站内的消防系统优先启动室内或室外消火

栓。当仅开启室内消火栓时,管网模型中变电站所在位置(节点 4)发生 20 L/s 的节点流量;结合表 1、图 4、图 5 可知,与无火灾工况对比,室内消火栓启动时,管网系统各节点压力略降低(见表 1 中的最大和最小节点水压),新增紧邻变电站上游的节点 253 处出现压力小于 $28 \text{ mH}_2\text{O}$ 的情况。当仅启动室外消火栓时,节点 4 流量增至 25 L/s ,此时管路系统中的水压进一步降低,变电站处(节点 4)出现水压小于 $28 \text{ mH}_2\text{O}$ 的情况(压力值为 $27.99 \text{ mH}_2\text{O}$)。

由此可见,这种直接从市政管网取水的消防方案中,单独开启室内或室外消火栓系统时,未对市政供水管网造成大面积显著影响。在模拟案例中,用水高峰时段启用变电站的室内或室外消火栓时,会额外造成 1~2 处节点压力低于 $28 \text{ mH}_2\text{O}$,且距离变电站较近的节点受影响较为显著。

3.2 室内、外消火栓同时启动时消防工况分析

当室内、外消火栓同时开启时,变电站的消防用水量达到 45 L/s ,管网系统中各主要节点的水压进一步降低。与单独开启室外消火栓工况相比,管路系统中低于 $28 \text{ mH}_2\text{O}$ 节点数量虽未增加(5 个),但变电站附近节点的水压降低明显,特别是变电站所在的节点 4,水压由室外消火栓单独开启时的 $27.99 \text{ mH}_2\text{O}$ 降低至 $26.28 \text{ mH}_2\text{O}$ 。

对于管网中节点流量短时内骤增导致附近区域节点水压降低的问题,可通过优化、调整管网设计方案来解决^[13]。随着城市化建设的发展,各中小城市(镇)的供水设施得到进一步完善,在市中心及近郊,供水管网大都布置成环状网形式,供水可靠性较高。依据文献^[7],环状网节点中的消防敏感区域,如本文模型中的 110 kV 变电站(节点 4),在不建设消防水池时,可采用 2 路市政给水干管向变电站的消火栓系统供水,从而大大提高消防用水点的供水安全。

结合图 4 可知,采用 2 路供水干管向变电站供水,确实提高了管网的消防用水可靠性。当室内消火栓启动时,变电站上游节点 253 的压力已经低于 $28 \text{ mH}_2\text{O}$,而此时,由于变电站可从另一路干管取水,保证了变电站处满足消防供水压力的要求,提高了供水可靠性^[14]。

3.3 水压小于 $28 \text{ mH}_2\text{O}$ 的节点水压变化规律

由图 5 可知:节点 153 为整个模型中的水压最低点,在非高峰时段及无火灾工况条件下,该点的水压大都低于 $28 \text{ mH}_2\text{O}$,因此,需对该节点采取增压措施;用水高峰时刻(21:00),各节点水压

达到最低值。

由图 5a 可知:当室内消火栓开启时,节点 101、103、153、253 的水压低于 28 mH₂O,与无火灾工况相比,变电站上游的节点 253 为新增降压点,由此可见,变电站发生火灾从管网取水灭火时,紧邻节点受影响更为显著;而此时,变电站所在节点 4 的水压仍满足 28 mH₂O 的需求,充分体现出采用 2 路干管向变电站供水的重要性^[9]。

由图 5b 可知,当室外消火栓开启时,变电站节点流量由 20 L/s 升至 25 L/s,由于节点流量增加不大,此时节点 4 在用水高峰时段的水压基本仍能满足 28 mH₂O 的供水要求。

由图 5c 可知:在用水高峰时段,当室内、外消火栓同时开启时,节点 4 的流量显著增加,达到 45 L/s,此时,变电站处水压降低至 26.28 mH₂O;其余节点水压降低幅度较小,消防用水不会严重影响周围居民用水需求。

4 结 论

本文利用 EPANET 2.0 构建包含变电站消防用水的城市供水管网水力模型,模拟分析变电站不同消防工况下的管网各节点水压的变化。在用水高峰时段(21:00—22:00),变电站消火栓系统在从市政管网连续取水的过程中,管网各节点压力值整体降低,且随着变电站消火栓系统需水量的增加,管网中不满足市政管网供水需求的节点数由 3 个增加至 5 个,但压力降低较大点主要集中在变电站附近,其余节点压力降低幅度较小。

变电站消防供水直接从 2 路市政供水干管取水具有一定的优势,在其中一路干管不满足供水需求时,可以从另一路干管取水,保证变电站处可以最大程度地满足市政管网供水压力的要求,提高了供水可靠性。因此,在市政管网可以满足消防给水要求时,可不设消防水池,直接从 2 路干管

取水。研究结果可为变电站的消防系统设计提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] 张蓉. 城市全户内变电站建筑设计研究[D]. 北京:北京建筑大学,2017.
- [2] 张玉玺,张锐. 变电站消防水系统[J]. 农村电气化,2020,11(6):19-22.
- [3] 曹利刚,石丽润,田军强,等. 变电站地下消防水池设计一例[J]. 给水排水,2008,44(增刊1):257-259.
- [4] 崔鲁,王慧,卢小钟,等. 城市中心地区全地下变电站消防系统设计研究[J]. 电气应用,2021,40(6):95-98.
- [5] 江新冬. 110 kV 半户内变电站的土建优化设计[J]. 山西建筑,2012,38(17):13-15.
- [6] 东北电力设计院有限公司. 火力发电厂与变电站设计防火标准:GB 50229—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019:28-48.
- [7] 中国中元国际工程公司. 消防给水及消火栓系统技术规范:GB 50974—2014[S]. 北京:中国计划出版社,2014:25-26.
- [8] 郭帅,马文莹,段园煜,等. 公路特长隧道群消防系统 EPA-NET 水力计算模型[J]. 给水排水,2016,42(2):74-77.
- [9] 宗永臣. 基于 EPANET 的某给水管网设计和优化[J]. 市政技术,2016,34(2):114-119,161.
- [10] ROSSMAN J. EPANET user's manual [Z]. Cincinnati:United States Environmental Protection Agency,2000.
- [11] 浙江省城乡规划设计研究院. 城市给水工程规划规范:GB 50282—2016 [S]. 北京:中国计划出版社,2016:26-27.
- [12] 王玮玮,钟少波. 遗传算法在消火栓供水优化问题中的应用[J]. 消防科学与技术,2019,38(2):240-243.
- [13] 秦倩. 银川市小区室外给水管网系统优化设计研究[D]. 西安:长安大学,2016.
- [14] 吕星颖. 某市城市供水管网优化及服务水压标准研究[D]. 成都:西南交通大学,2020.

(责任编辑 张淑艳)