

## 220 kV 户内变电站屋顶构架结构体系及其抗震性能

王庭华<sup>1</sup>, 黄 峥<sup>1</sup>, 丁静鹄<sup>1</sup>, 徐 淦<sup>2</sup>, 顾伟华<sup>3</sup>, 张大长<sup>3</sup>

(1. 国网江苏省电力公司经济技术研究院, 江苏 南京 210008;

2. 国网江苏省电力公司镇江供电公司, 江苏 镇江 212002;

3. 南京工业大学土木工程学院, 江苏 南京 211816)

**摘 要:**研究了新型 220 kV 户内变电站屋顶构架结构体系的结构特性和整体抗震性能, 建立常规构架和屋顶构架的有限元模型, 考虑屋顶构架-GIS 综合楼上下刚度分布不均匀, 开展了上下结构共同作用的结构体系的地震反应分析。通过结构体系的模态分析得到其振动特性, 采用时程分析法得到整体结构的动力特性, 比较分析了不同结构体系的地震反应特性, 研究结果表明新型变电站屋顶构架的抗震设计应加强屋顶构架的侧向刚度和连接节点的强度。

**关键词:**屋顶构架-GIS 综合楼; 动力特性; 时程分析

**中图分类号:** TM 632<sup>+</sup>.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2017)05-0076-05

### 0 引言

变电站及变电构架作为电力工业的一个重要部分, 负有重要的社会功能, 其设计直接关系到电网建设的安全、经济和电网运行的稳定, 一旦在地震、雪灾等灾害条件下发生破坏, 引起的损失将无法估量。随着我国电网建设的高速发展, 220 kV 和 500 kV 变电站正在大量建设, 1000 kV 特高压变电站亦开始起步建设, 一般采用全钢结构构架, 用钢量不断递增, 工程造价随之上涨。为充分体现安全、可靠、经济的设计原则, 项目建设对变电构架设计的研究和高强钢材的应用提出更高的要求。变电构架作为变电站的主要结构, 明确其优化方向、设计手段以及高强钢的合理应用, 具有明显的技术经济效益和社会效益。

在以往对变电构架的研究中, 变电构架一般作为一个单独的研究对象, 分析时通常只考虑变电构架自身的结构特性和地震反应以及抗震性能。吴伟康等<sup>[1]</sup>使用空间结构计算分析软件完成变电构架的静力分析。杨保疏等<sup>[2]</sup>介绍了 500 kV 构架的主要结构形式, 并简单分析了各种结构形式的技术经济特点。王磊等<sup>[3]</sup>通过考虑有无设计荷载作用下的变电构架柱的地震反应时程分析, 对螺栓连接的变电构架柱的抗震性能进行了一定的研究。邓东生等<sup>[4]</sup>运用有限元分析方法对变电构架进行了结构模态分析, 研究了小根开构架的抗震性能。文

献[5-10]对变电站建筑物的建筑布置及结构选型进行了优化分析, 得出合理的布置方案。文献[11-16]对不同类型的变电站构架结构选型及空间进行了分析, 给出不同结构形式的构架的优缺点。

文中针对一种新型户内变电站屋顶变电构架, 即将变电构架设置在 GIS/AIS 建筑屋顶形成屋顶构架, 建立具有代表性的屋顶构架-GIS 综合楼整体有限元模型, 分析屋顶构架结构与常规构架的结构性能差异, 并在 7 度(0.1 g)的地震烈度下, 进行了屋顶构架与常规构架抗震性能的对比分析, 为今后类似的实际工程提供一些参考与建议。

### 1 屋顶构架-GIS 综合楼整体布置及模型

以镇江某 220 kV 变电站屋顶构架的试点工程为算例, 建立常规构架、GIS 综合楼、屋顶构架-GIS 综合楼 3 个有限元模型, 屋顶构架-GIS 综合楼柱脚刚接, 上部屋顶构架模型各构件间连接形式为刚接。其中 GIS 综合楼为两层钢结构框架, 采用箱型钢管柱, 第一层层高 5.5 m, 第二层 7.5 m。屋顶变电构架采用单钢管构架, 构架跨度 48.4 m, 分为四跨, 底部根开 3 m, 上设三层挂点, 高度分别为 15.9 m, 20.9 m, 25.9 m。综合楼与屋顶构架材料均采用 Q345, 建立模型时变电构架立柱采用杆单元, 变电构架横梁采用梁单元, 变电站屋顶构架为典型的线性结构。由文献<sup>[4]</sup>可知, 对于变电构架, 各杆件之间采用固接和铰接形式对结构的静力和动力特性影响不大, 该项目中屋顶构架各杆件之间采用固接形式。常规构架、GIS 室综合楼、屋顶构架-GIS 综合楼有限元软件模型如图 1、图 2 和图 3 所示。

收稿日期: 2017-04-23; 修回日期: 2017-05-29

基金项目: 国家电网公司 2016 年科技项目(户内变电站屋顶构架应用研究)

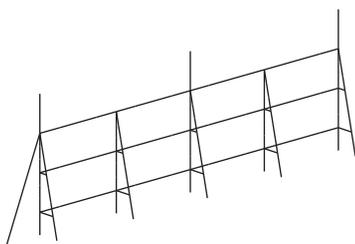


图1 常规构架有限元模型

Fig.1 Finite element model of conventional frame

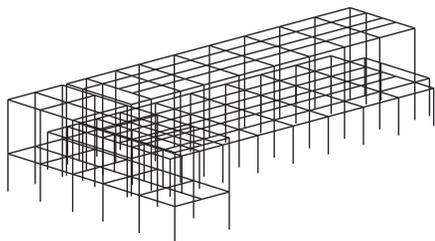


图2 GIS综合楼有限元模型

Fig.2 Finite element model of GIS building

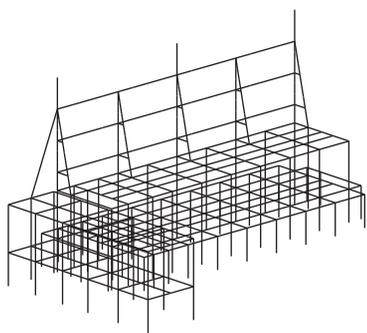


图3 屋顶构架-GIS综合楼有限元模型

Fig.3 Finite element model of roof frame-GIS building

## 2 屋顶构架与常规构架内力对比分析

### 2.1 荷载参数

荷载模式只考虑不同工况下的导线荷载、地线荷载以及风荷载。风荷载按荷载参数表给出的风速  $v$  求得基础风压。风荷载准值参照文献[17]:

$$\omega_k = \beta_z \mu_s \mu_z \omega_0 \quad (1)$$

式中,  $\omega_k$  为风荷载标准值;  $\beta_z$  为杆塔风荷载调整系数;  $\mu_s$  为构件体型系数;  $\mu_z$  为风压高度变化系数;  $\omega_0$  为基础风压。立柱、地线支架及水平桁架梁等杆件的风荷载为各风荷载标准值乘以杆件直径, 转化为各杆件上的线荷载; 导线荷载及地线荷载按荷载表给出的荷载值, 采用节点力的方式施加在导线挂点处。考虑最不利荷载组合, 按文献[17]取  $1.2 \times$  永久荷载 +  $1 \times$  活荷载 +  $1.4 \times$  风荷载。

### 2.2 内力计算结果分析

运用 SAP2000 有限元分析软件, 按照空间杆系

结构进行建模, 建模时选择梁单元和杆单元。分别对屋顶构架和常规构架开展受力分析, 提取主要受力杆件的综合应力比和杆件位移, 进行对比分析。屋顶构架与常规构架主要受力杆件规格对比见表 1, 各层挂点横梁位移对比见表 2。

表1 屋顶构架与常规构架主要杆件规格对比

Table 1 Comparison of the main members of the roof frame and the conventional frame

构件	常规构架		屋顶构架	
	规格	应力比/%	规格	应力比/%
主管 1	D273×6	40.1	D325×6	24.6
主管 2	D273×6	77.8	D325×6	56.9
主管 3	D273×6	73.3	D325×6	52.6
主管 4	D273×6	56.3	D325×6	57.1
主管 5	D273×6	37.8	D325×6	22.6
斜管 1	D273×6	48.9	D325×6	36.8
斜管 2	D273×6	74.5	D325×6	65.1
斜管 3	D273×6	46.6	D325×6	35.1
斜管 4	D273×6	74.8	D325×6	65.1
斜管 5	D273×6	70.1	D325×6	60.7
横梁	D200×6	82.9	D273×6	44.7

注: 直杆从左往右分别为主管 1-5; 斜杆从左往右分别为斜管 1-5。

表2 屋顶构架与常规构架横梁挂点位移对比

Table 2 Comparison of the displacement of the roof frame and the conventional frame

位置	位移/mm	
	常规构架	屋顶构架
三层挂点	29	55.4
二层挂点	17	40.8
一层挂点	15	30.4

由表 1 和表 2 可知: 屋顶构架在减少占地空间置于屋顶时, 其自身结构高度增加, 各主要受力杆件在满足受力要求时, 尺寸规格较常规构架均有所增大。在静力位移上, 屋顶构架因所受荷载较大, 各层横梁位移均大于常规构架, 但未超出安全限值, 三层挂点位移屋顶构架是常规构架的 1.91 倍; 二层挂点位移屋顶构架是常规构架的 2.4 倍; 一层挂点位移屋顶构架是常规构架的 2.03 倍。

## 3 屋顶构架模态分析

分析屋顶构架-GIS 综合楼的动力特性, 得到整体结构的自振频率, 如表 3 所示, 结构前三阶振型如图 4 所示。

通过结构自振频率以及振型分析可知: 结构的平动自振周期明显大于扭转振动周期, 说明该结构的扭转刚度较大, 不容易发生整体结构的扭转振动; 结构 X 向自振周期明显大于结构 Y 向自振周

期,说明结构刚度方向分布的差异,X向刚度小于Y向刚度。

表3 屋顶构架-GIS综合楼自振频率

阶数	频率/ Hz	振型
1	0.951	X方向平动
2	1.017	Y方向平动
3	1.161	绕Z轴扭转
4	1.433	X方向平动
5	2.513	Y方向局部振动
6	2.597	X方向平动

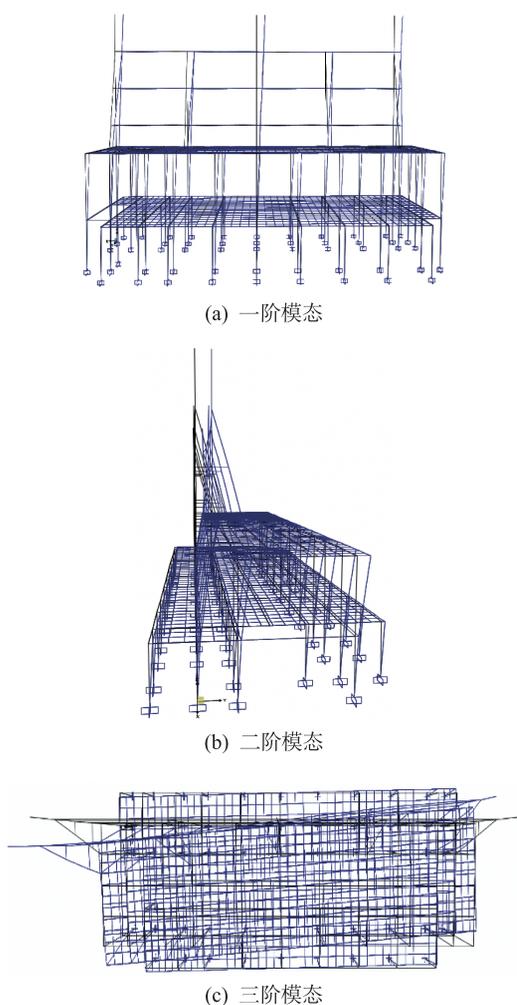


图4 前三阶振型

Fig.4 Former three vibration modes

整体模型因上下刚度分布不均匀,屋顶构架的变形大于GIS室主控楼的变形。结构在第五阶时出现了构架横梁的局部振动,变为横梁的局部变形,为防止结构在地震作用下激起局部振型,造成结构过早动力失稳,设计时可以适当增加水平约束加以控制。整体模型基本不存在竖向震动,设计时应着重考虑水平地震的影响。

## 4 屋顶构架-GIS综合楼地震响应分析

### 4.1 输入地震波

选用天然地震波 Taft 作为地震荷载输入,选用其前 40 s 地震加速度记录进行模拟分析。采用所选的 Taft 波沿导线拉线方向输入。Taft 地震波加速度峰值  $1527 \text{ mm/s}^2$ ,其频谱特性如图 5 所示。

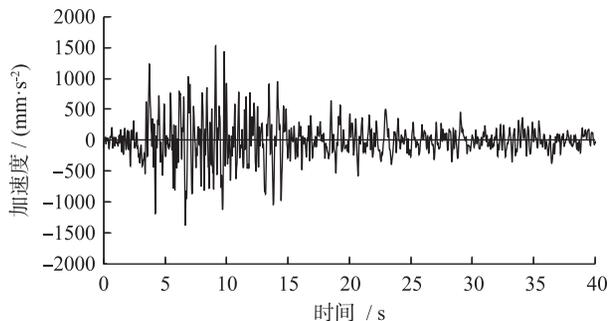


图5 Taft地震波频谱特性

Fig.5 Frequency spectrum of the Taft earthquake wave

### 4.2 GIS综合楼地震反应分析

地震波输入总时间为 40 s,时间间隔 0.02 s,考虑到自重对结构的影响,先进行重力荷载作用下的静力分析,再进行地震动力时程分析。

针对 GIS 综合楼模型,在上部有无屋顶构架的情况下分别进行地震动力时程分析,其结构二层位移及加速度时程对比曲线如图 6、图 7 所示。

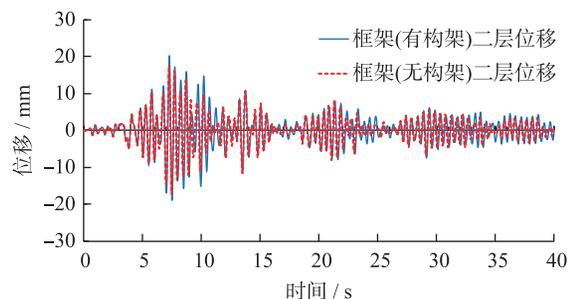


图6 Taft地震波作用下GIS综合楼位移时程

Fig.6 Displacement time-history at the GIS building under Taft earthquake

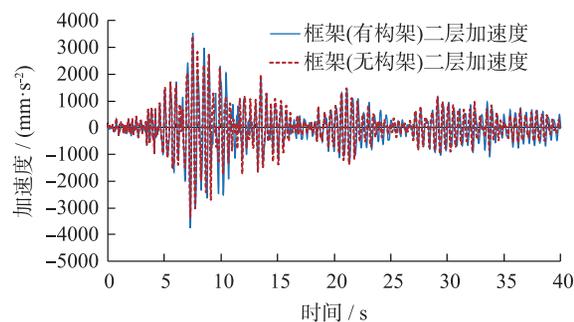


图7 Taft地震波作用下GIS综合楼加速度时程

Fig.7 Acceleration time-history at the GIS building under Taft earthquake

由图6、图7可知, GIS综合楼上部有无屋顶构架的位移和加速度时程曲线基本重合。可知,将变电构架置于综合楼屋顶时,上部屋顶构架在动力反应特性上对下部综合楼建筑结构影响不大。

#### 4.3 屋顶构架地震反应分析

将Taft地震波以相同方向分别作用于屋顶构架和常规构架。图8沿屋顶构架-GIS综合楼高度变化的节点位移值,由图可得:整体模型在地震波的作用下,节点位移沿高度增加,在屋顶构架与主控楼连接处因整体刚度变化,上升趋势较为缓慢,在屋顶构架地线柱顶端的节点位移最大。

在Taft地震波作用下屋顶构架-GIS综合楼与常规构架的挂点位移时程对比曲线如图9、图10和图11所示。

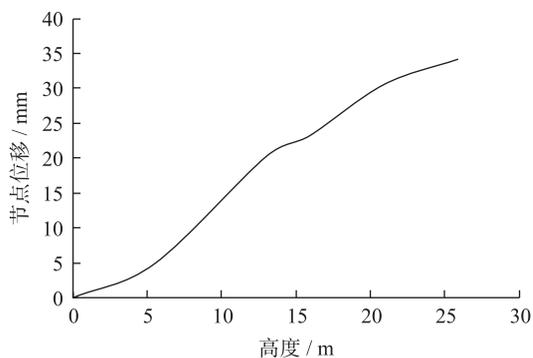


图8 屋顶构架-GIS综合楼沿高度变化节点位移  
Fig.8 Displacement of the nodes along the frame-GIS building

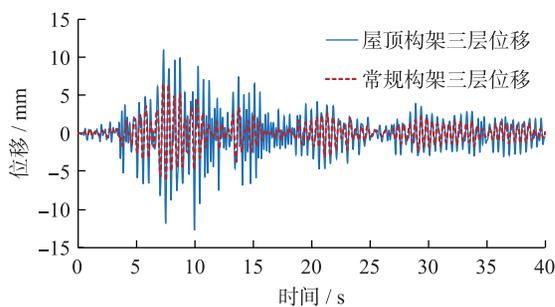


图9 Taft地震波作用下三层位移时程  
Fig.9 Displacement time-history at the third layer under Taft earthquake

由图9—11可知:(1) Taft地震波以相同方向作用于屋顶构架和常规构架上,位移反应趋势相差不大,屋顶构架三层横梁的相对最大位移为14.12 mm,常规构架三层横梁的最大位移为6.32 mm。(2) 屋顶构架较常规构架相比时程位移差距较大。三层位移屋顶构架是常规构架的2.23倍;二层挂点位移屋顶构架是常规构架的4.54倍;一层挂点位移屋顶构架是常规构架的4.57倍。

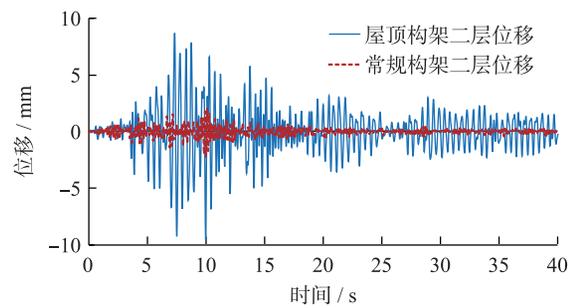


图10 Taft地震波作用下二层位移时程  
Fig.10 Displacement time-history at the second layer under Taft earthquake

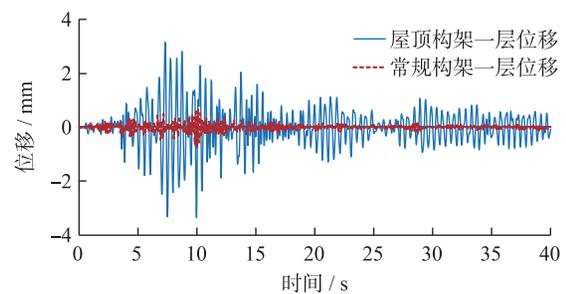


图11 Taft地震波作用下一层位移时程  
Fig.11 Displacement time-history at the first layer under Taft earthquake

当屋顶构架置于GIS综合楼屋顶时,其整体结构体系属于上下刚度分布不均匀的上柔下刚结构,整体结构的地震反应特性已与细柔的常规构架有所不同,为防止其出现动力失稳,在设计时应注重加强屋顶构架的侧向刚度。

#### 4.4 应力反应分析

表2为屋顶构架最大应力值,可以看出:地震波作用下应力最大出现于屋顶构架柱与GIS综合楼屋顶连接处,主材最大应力为18.291 MPa,未造成主材屈服。

表4 屋顶构架应力

位置	应力	位置	应力
三层挂点	12.09	一层挂点	18.246
二层挂点	16.605	柱脚处	18.291

## 5 结语

综上所述,在结构内力上,屋顶构架与常规构架差异较大,主要受力构件尺寸规格及节点位移均大于常规构架;变电构架置于综合楼屋顶时,上部屋顶构架在动力反应特性上对下部综合楼建筑结构影响不大;屋顶构架-GIS综合楼在Taft地震波作用下,构件位移结构中的高度越大其位移越大,位移最大构件位于屋顶构架柱顶端地线支架处;屋顶

构架-GIS 综合楼属于上柔下刚结构,上部屋顶构架地震反应特性较大,为防止结构出现动力失稳,在设计时应注重加强屋顶构架的侧向刚度;屋顶构架-GIS 综合楼在 Taft 地震波作用下,连接节点为屋顶构架的应力最大处,设计时应注意加强连接节点的强度。

#### 参考文献:

- [1] 吴伟康. 应用 STAAD CHINA 设计变电构架[J]. 电力建设, 2008(2): 44-45.  
WU Weikang. The application of STAAD CHINA design of the substation [J]. Power construction, 2008(2): 44-45.
- [2] 杨保疏. 500 kV 变电所构架的结构选型[J]. 福建电力与电工, 1999, 19(3): 24-26.  
YANG Baoliu. Structure selection of 500 kV substation structure [J]. Fujian Electric Power and Electrical Engineering, 1999, 19(3): 24-26.
- [3] 王磊, 吕涛, 朱爱珠, 等. 变电构架柱地震反应时程分析[C]//第18届全国结构工程学术会议, 中国广州, 2009.  
WANG Lei, LYU Tao, ZHU Aizhu, et al. Seismic response time history analysis of the frame column of the structure[C]//The Eighteenth National Conference on Structural Engineering, Guangzhou, China, 2009.
- [4] 邓东生, 马昌勤, 王晨, 等. 小根开变电构架的动力特性与抗震性能分析[J]. 安徽建筑, 2012(5): 144-145.  
DENG Dongsheng, MA Changqin, WANG Chen, et al. Root opening characteristics and seismic performance of the dynamic analysis of substation structure [J]. Anhui Building, 2012(5): 144-145.
- [5] 黄华生. 变电站设备屋顶布置方案[J]. 农村电气化, 2010(3): 9-10.  
HUANG Huasheng. Roof layout scheme of substation equipment [J]. Rural Electrification, 2010(3): 9-10.
- [6] 张哲, 李天, 李光, 等. 大召营高型变电构架的动力特性分析[J]. 世界地震工程, 2004(3): 141-145.  
ZHANG Zhe, LI Tian, LI Guang. Analysis of dynamic characteristics of high power transformation truss in Dazhaoying [J]. World Earthquake Engineering, 2004(3): 141-145.
- [7] 李国文, 窦杰, 张大长. 220 kV 人字柱变电构架-格构横梁结构选型分析[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(2): 65-68.  
LI Guowen, DOU Jie, Zhang Dachang. 220 kV column substation framework-lattice beam structure selection analysis [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(2): 65-68.
- [8] 王椿丰, 熊静, 卫银忠, 等. 基于 GIS 设备的智能变电站电气接线方案优化研究[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(4): 11-14.  
WANG Chunfeng, XIONG Jing, Wei Yinzong, et al. Study on the optimization of electrical connection scheme of intelligent substation based on GIS equipment [J]. Jiangsu Electric Engineering, 2016, 35(4): 11-14.
- [9] 吴罡, 李琳, 李翔. 110 kV 智能变电站设计方案初探[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(2): 31-35.  
WU Gang, LI Lin, LI Xiang. A preliminary study on the design of 110 kV intelligent substation [J]. Jiangsu Electric Engineering, 2011, 30(2): 31-35.
- [10] 李旭. 对变电站 220 kV GIS 设备安装的探讨[J]. 科技资讯, 2010(5): 129-130.  
LI Xu. Discussion on installation of 220 kV GIS equipment in substation [J]. Science and Technology Information, 2010(5): 129-130.
- [11] 杨明, 王尉, 王磊, 等. 1000 kV 全联合变电构架风荷载效应研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010(S1): 100-104.  
YANG Ming, WANG Wei, WANG Lei, et al. Study on the wind load effect of 1000 kV fully integrated substation frame [J]. Journal of Wuhan University (Engineering Science Edition), 2010(S1): 100-104.
- [12] 朱爱珠, 郭耀杰, 程超, 等. 变电构架柱的节点试验研究与有限元分析[J]. 土木工程学报, 2007(11): 9-14.  
ZHU Aizhu, GUO Yaojie, CHENG Chao. Experimental study and finite element analysis on the joints of the frame column [J]. Journal of Civil Engineering, 2007(11): 9-14.
- [13] 徐敏若. 500 kV 东善桥变电所构架选型分析[J]. 江苏电机工程, 1996, 5(3): 1-6.  
XU Minruo. 500 kV analysis of the structure type selection of the East Bridge substation [J]. Jiangsu Electric Engineering, 1996, 5(3): 1-6.
- [14] 陈传新, 刘素丽. 750 kV 变电构架结构选型[J]. 电力建设, 2007, 28(5): 33-35.  
CHEN Chuanxin, Liu Suli. 750 kV structure selection [J]. Electric Power Construction, 2007, 28(5): 33-35.
- [15] 王进. 升压站水泥构架防腐加固[J]. 江苏电机工程, 2003, 22(6): 27-28.  
WANG Jin. Anti corrosion and reinforcement of concrete frame in booster station [J]. Jiangsu Electric Engineering, 2003, 22(6): 27-28.
- [16] 朱朝阳, 靳振宇. 变电构架的空间分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(S): 110-112.  
ZHU Zhaoyang, JIN Zhenyu. Spatial analysis of substation frame [J]. Journal of Wuhan University (Engineering Science Edition), 2010, 43(S): 110-112.
- [17] GB50009—2012 建筑结构荷载规范[S].  
GB50009—2012 Load code for building structures[S].

#### 作者简介:



王庭华

王庭华(1967—),男,江苏南京人,高级工程师,从事结构工程研究(E-mail: zouxiaoyue587@sohu.com);

黄峥(1980—),男,江苏南京人,高级工程师,从事电网工程设计及相关研究工作;

丁静鹄(1984—),男,江苏南京人,博士,从事电网工程设计及相关研究工作;

徐淦(1983—),男,江苏镇江人,高级工程师,从事电网工程设计及相关研究工作;

顾伟华(1993—),男,江苏盐城人,硕士研究生,从事变电压建领域的研究工作;

张大长(1971—),男,浙江绍兴人,教授,博士,从事土木工程相关研究及教学工作(E-mail: dczhangchina@163.com)。

(下转第 92 页)

## Smart Charging Control Electrical Vehicles Based on Two-level Charge Management System

ZHANG Jun<sup>1</sup>, HAN Huachun<sup>2</sup>, YUAN Zengquan<sup>3</sup>

- (1. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd, Beijing 100190, China;  
2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China;  
3. Institute of Electrical Engineering CAS, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The application of large-scale electric vehicles (EVs) poses a threat to grid stability if charged without control. It needs expansion of the grid capacity and leads to major investment in current grid and capacity-wasting in low-load time. This paper proposes a solution based on two-level electric vehicles charging management system (EVCMS) to optimal demand side management by means of scheduling charging time and setting charging rates. The influence factors for power management include electricity prices, state-of-charge (SOC) of the battery, electricity available, park duration and others. All these can be achieved through charge terminals (CTs)

**Key words:** electric vehicle; EVCMS; CTs; fuzzy inference

(编辑 徐林菊)

(上接第 80 页)

## Research on the Structural Property and Seismic Performance of the 220 kV Roof Frame-GIS Complex Building

WANG Tinghua<sup>1</sup>, HUANG Zheng<sup>1</sup>, DING Jinghong<sup>1</sup>, XU Gan<sup>2</sup>, GU Weihua<sup>3</sup>, ZHANG Dachang<sup>3</sup>

- (1. State Grid Jiangsu Economics Research Institute, Nanjing 210008, Jiangsu;  
2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Zhenjiang power Supply Company, Zhenjiang 212002, China;  
3. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** In order to research the whole seismic performance of the new indoor substation roof frame-GIS complex building, the finite element models of the conventional frame and roof frame are made. Considering the uniform up and down stiffness of the roof frame-GIS building, the seismic response of the structure system which has an upper and lower structure interaction is made. The vibration characteristics and dynamic characteristics could be concluded by the modal and time-history analysis. By comparing and analyzing these numerical results, it can be seen that the lateral stiffness and the connection node of the new indoor substation roof frame should be strengthened.

**Key words:** roof frame-GIS building; dynamic characteristics; time-history analysis

(编辑 刘晓燕)

(上接第 85 页)

## Research on Cost Sensitivity and Cost Estimation Model of Low-voltage Switchgear

XIE Jiazheng<sup>1</sup>, XIA Chengjun<sup>1</sup>, MA Zhongneng<sup>2</sup>

- (1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;  
2. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd, Guangzhou 510620, China)

**Abstract:** Taking low-voltage switchgear for research object, based on a large number of domestic mainstream manufacturers, arithmetic mean value of percentages of components of several typical configurations from the total cost was regarded as cost sensitivity of various components of the low-voltage switchgear for analyzing similarities and differences of cost sensitivities of domestic and joint venture manufacturers. Using multiple regression analysis method and on the premise of ensuring voltage level, function and type, the cost of low-voltage switchgear can be obtained by inputting low-voltage switchgear's capacity, rated current and rated compensation capacity so as to establish a cost estimation model for low-voltage switchgear, which was useful to guide determination and estimation on purchasing target price of power grid materials.

**Key words:** low-voltage switchgear; cost sensitivity; cost modeling; multiple regression analysis

(编辑 徐林菊)