［超高层建筑］

基于 ETAP 模拟超高层建筑发电机系统电压偏差研究

文/北京市建筑设计研究院有限公司　陈钟毓

基于 ETAP 软件的建模，对高度 300 m 以下的超高层建筑发电机配电系统的压降进行了模拟计算。对不同系统形式以及不同建筑高度的线路末端压降进行了对比计算。并根据计算结果进行分析，对发电机配电系统的设置提出了几点建议。

当前超高层建筑在国内各地大量兴起。相比于一般建筑，超高层建筑的消防救援更加困难，因此超高层建筑其供电保障尤为重要。在 GB 51348—2019《民用建筑电气设计标准》中要求 150 m 以上的超高层公共建筑的消防负荷应为一级负荷中特别重要负荷。因此 150 m 以上的超高层项目一般均设置有柴油发电机组，除了为消防负荷提供应急电源外，还可为楼内一些重要负荷提供后备电源。

在超高层项目柴油发电机组的设置上，常规 300 m 以下建筑，在没有数据机房等特殊负荷需求的前提下，一般都采用低压柴油发电机组。决定低压柴油发电机组设置的主要因素是发电机配电系统线路的电压偏差。

出于防火安全、楼板荷载和设备运输等因素的考虑，柴油发电机组一般都是设置在建筑地下室。由于变配电室设置的位置以及末端负载位置的不同，柴油发电机组配电系统末端的电压偏差不尽相同。按照规范要求，电压偏差允许值：照明±5%，一般电动机±5%，电梯电动机±7%。基于 380 V 额定电压等级的基础上，配电线路的总电压偏差应在此允许值范围内。

在柴油发电机运行时，电动机设备的起动对于整个配电系统电压降有影响。电动机起动时，尤其是大功率电动机全压起动时，起动电流很大，使得电源侧内阻抗压降变大，输出电压下降，在短时间内拉低母线压降。因此配电系统远端的一些电压降不利点，很有可能会由于电动机起动造成的短时电压降低，导致该点的电压降进一步降低，超出了规范要求的范围。

基于以上两点，借助 ETAP 软件搭建的配电系统模型并进行模拟。依托计算软件可以方便地调整系统配置参数，对多种系统设置条件的结果进行比对分析。从而总结出柴油发电机组配电系统设置的限制条件和优化措施。

配电系统模型

系统模型的搭建参考了某 300 m 超高层项目的实际负荷数据及线缆长度。本文仅研究低压柴油发电机组的设置，简化了系统模型，系统主接线示意

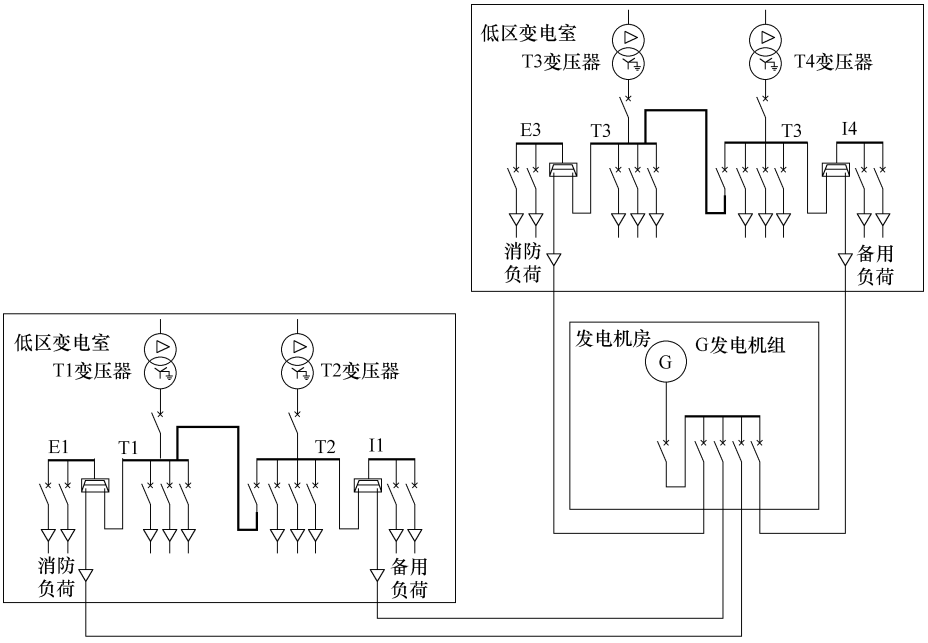

图 1　计算模型配电系统主接线图

如图 1 所示。模型中选取了两个变配电室 TA、TB。其中 TA 变电室负担建筑地下室及建筑低区负荷，TB 变电室负担建筑高区负荷。考虑两种发电机组的设置形式：合用发电机 G（负担 TA、TB 变电室）以及分设发电机 G_1（负担 TA 变电室）、G_2（负担 TA 变电室）。两种发电机组设置分别如图 2、图 3 所示。在此基础上，根据 TB 变电室设置的位置不同：位于地下和地上高区（250 m 设备层）。一共搭建了四种配电系统形式的模型。计算模型示意如图 4 所示。

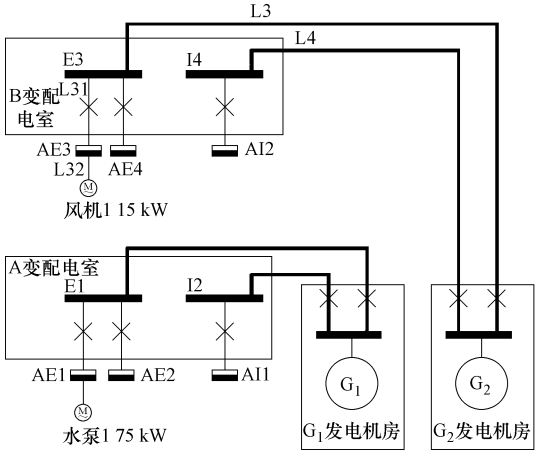

图 3　简化模型主接线 2，分设发电机组

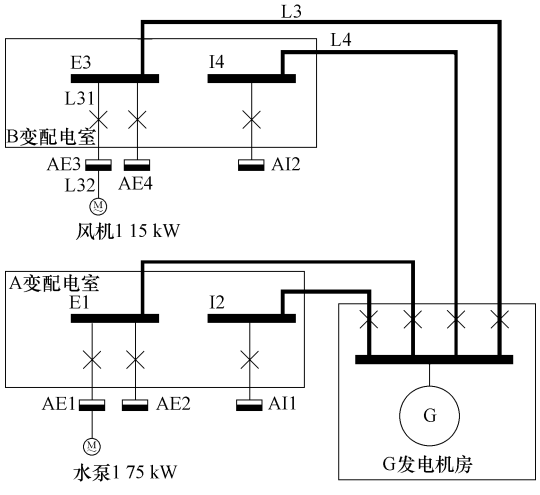

图 2　简化模型主接线 1，公用发电机组

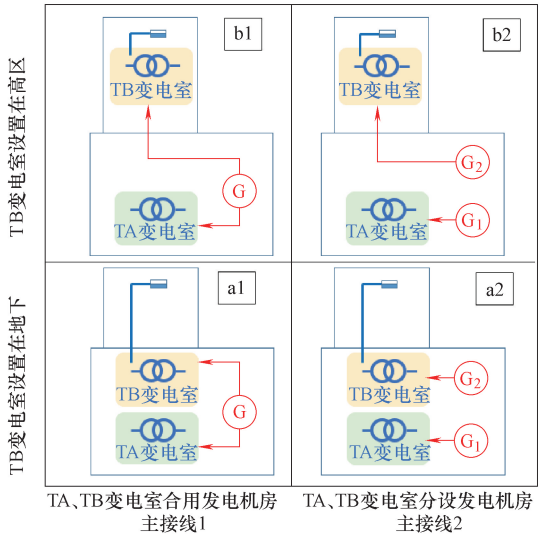

图 4　4 种计算模型示意图

设计参数

1. 计算软件

采用 ETAP19 版：基础模块、潮流分析模块和电动机起动模块。

2. 发电机组参数

发电机类型为柴油机；发电机控制方式为电压控制；出口电压为 230/400 V；功率因数为 0.8；效率为 95%；复合励磁形式为阻抗为数据库典型值；动态模型为次暂态。

模型中柴油发电机组规格详见表 1。

表 1　柴油发电机规格

设备名称	设备编号	参数
柴油发电机组	G	1 250 kW 应急备用功率(ESP)
柴油发电机组	G_1	630 kW 应急备用功率(ESP)
柴油发电机组	G_2	400 kW 应急备用功率(ESP)

3. 负荷参数

末端负荷功率详见表 2。表 2 中●表示负荷在该状态下保持使用。

表 2　负荷参数

配电箱编号	负荷类型	总功率/kW	消防状态	失电状态
AE1	消防水泵	250	●	
	└→水泵 1	75	●	
AE2	消防等效负荷	400	●	
AI1	重要等效负荷	300		●
AE3	正压送风机	30	●	
	└→风机 1	15	●	
AE4	消防等效负荷	350	●	
AI2	重要等效负荷	100		●

4. 导体参数

表 3　初始导体参数

导体编号	负载功率/kW	计算电流/A	上级整定值/A	电缆/导线规格
L3	380	679	750	WDZAN-YJY-2(4×300+1×150)
L31	30	54	80	WDZAN-YJY-1(4×25+1×16)
L32	15	27	40	WDZAN-YJY-1(4×10)

表 3 中初始导体参数为仅按照开关整定值及导体载流量选取的电缆规格，暂未考虑线路长度引起的电压降。其中电缆类型为交联聚乙烯绝缘电缆，其载流量及相关系数参考规范“GB/T 16895.6—2014”。载流量数据为表 B.52.5；热固性绝缘；带负荷导体芯数 3 芯；敷设在无孔托盘中（方式 C）；导体温度 90 ℃；环境温度 30 ℃（空气中）。多回路或多根电缆成束敷设的降低系数参考为表 B52.17；电缆相互接触敷设在无孔托盘中；回路数 9 路及以上，系数 0.7。

5. 电缆长度

表 4　电缆长度

计算模型类型	a1,a2		
导体编号	L3	L31	L32
导体长度	70	370	35
计算模型类型	b1,b2		
导体编号	L3	L31	L32
导体长度	335	70	35

搭建模型

根据预设的主接线图，分别搭建了 a1、a2、b1 和 b2 四种模型的 ETAP 模型。采用 ETAP 对 TB 变电室最不利点（L32 线路末端）的电压降进行模拟计算。模型示意如图 5 所示。

计算结果及分析

1. 初始电压降

在套用表 3 的初始电缆规格后计算结果见表 5。

表 5　初始电压降

模型编号	线路名称	电压/V	电压降(%)	电缆规格
a1	L32 线路末端	354	6.8	L31:4×25+1×16
b1	L32 线路末端	371	2.4	L31:4×25+1×16
a2	L32 线路末端	354	6.8	L31:4×25+1×16
b2	L32 线路末端	371	2.4	L31:4×25+1×16

表 5 中可以看到，由于配电距离的原因，模型 a1、a2 最不利点压降已经超出了规范要求。需要适

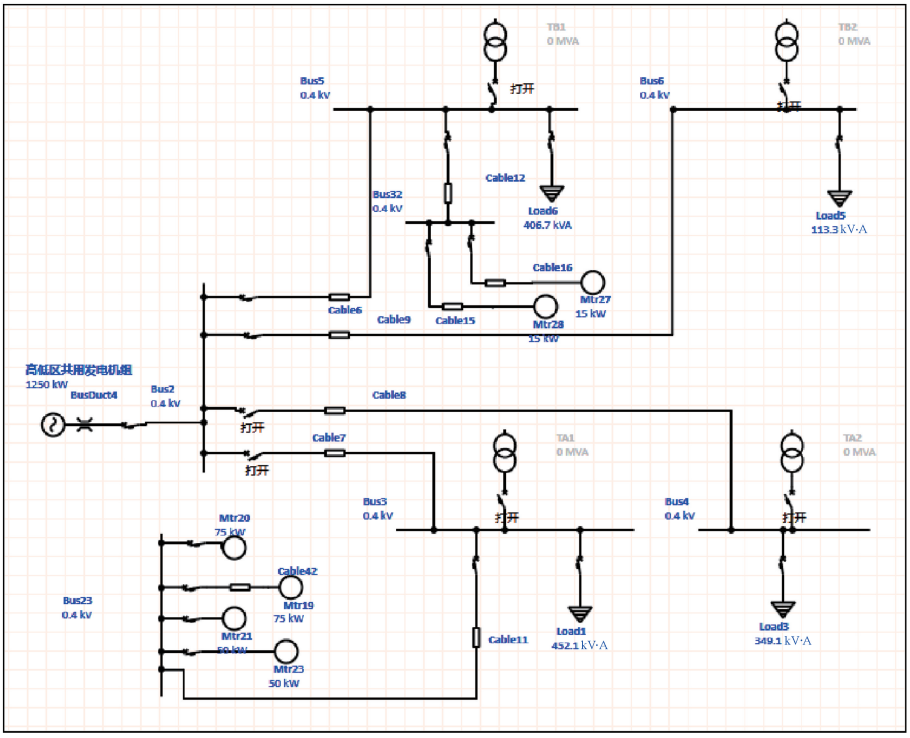

图 5　ETAP 模型示意

当增大配电线路电缆截面积，减少线路电压降。

2. 建筑高度 300 m 电压降

根据调整后的电缆规格，导入 ETAP 中，得到最不利点电压降见表 6。

表 6　调整后电压降

模型编号	线路名称	电压/V	电压降（%）	电缆规格
a1	L32 线路末端	372	2. 1	L31:4×50+1×25
b1	L32 线路末端	371	2. 4	L31:4×25+1×16
a2	L32 线路末端	372	2. 1	L31:4×50+1×25
b2	L32 线路末端	371	2. 4	L31:4×25+1×16

表 6 中可以看到，四种模型的电压降都达到了一个相对合理的水平。由于目前的柴油发电机采用的都是电压控制型调节，发电机运行时保持出口电压维持 400 V。因此发电机组合用与分设对于末端压降影响不大。

从计算结果来看，高区设置变电室对柴发末端压降较为有利。这是由于线路电压降与线路阻抗以及线路上通过的电流有关。相同长度的电缆，在流过 100%额定导体载流量的条件下，电缆载流量和电缆的线路阻抗成反比，其变化趋势如图 6 所示。通俗的说就是电缆截面积越大，电缆的使用效率越高，输送额定载流量电流产生的压降越小。由于高区设置变电室，长距离敷设的是发电机主干电缆，其电缆截面积较大，对末端电压降更为有利。同时发电机电缆占用的竖向空间也相对较小。

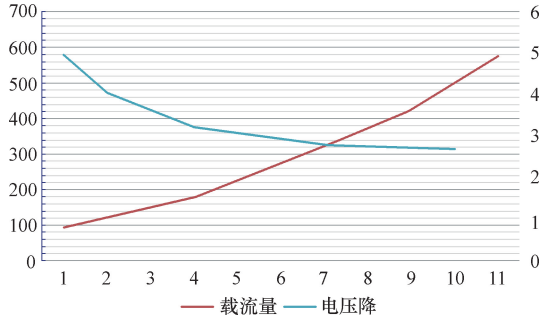

图 6　电缆载流量与额定电压降趋势图

结论：无论采用那种模型形式，300 m 以下超高层建筑，通过适当调整配电线路截面积，采用低压柴油发电机组可以满足末端压降的要求。对于 300 m 高度的建筑，高区设置变电室对于最不利点的发电机配电线路电压降更为有利。

3. 调整建筑物高度电压降

调整建筑的楼层高度，分别计算了 250 m、200 m 和 150 m 三种建筑高度时末端负载电压降的情况，见表 8～表 10。

表 8　建筑高度 250 m 电压降

模型编号	线路名称	电压偏差	电压降（%）	电缆规格
a1	L32 线路末端	371	2.4	L31:4×35+1×16
b1	L32 线路末端	373	1.8	L31:4×25+1×16
a2	L32 线路末端	371	2.4	L31:4×35+1×16
b2	L32 线路末端	373	1.8	L31:4×25+1×16

表 9　建筑高度 200 m 电压降

模型编号	线路名称	电压偏差	电压降（%）	电缆规格
a1	L32 线路末端	367	3.4	L31:4×25+1×16
b1	L32 线路末端	376	1.1	L31:4×25+1×16
a2	L32 线路末端	367	3.4	L31:4×25+1×16
b2	L32 线路末端	376	1.1	L31:4×25+1×16

表 10　建筑高度 150 m 电压降

模型编号	线路名称	电压偏差	电压降（%）	电缆规格
a1	L32 线路末端	371	2.4	L31:4×25+1×16
b1	L32 线路末端	379	0.3	L31:4×25+1×16
a2	L32 线路末端	371	2.4	L31:4×25+1×16
b2	L32 线路末端	379	0.3	L31:4×25+1×16

表 8~表 10 中可以看到，建筑高度为 200 m 以下时，在配电电缆截面积不增大的情况下，变电室在高区设置与地下设置最不利点的发电机配电线路电压降基本相同。

结论：200 m 及以下超高层建筑，建议变电室均设置在地下。可以避免变压器上楼带来的运输问题以及小容量变压器的使用效率问题。同时可以减少地上设备机房的占用。

4. 电动机起动时的电压降

针对不同容量的发电机组，电动机起动时对于母线电压降的影响不尽相同。模拟了 L32 线路末端 15 kW 风机起动时，配电箱 AE3 母线的电压降情况。

图 7 为合用发电机组，发电机组容量为 1 250 kW 时，风机起动时的配电箱母线电压动态曲线。

图 8 为分设发电机组，发电机组容量为 400 kW 时，风机起动时的配电箱母线电压动态曲线。

从图 7、图 8 可以看出，风机起动时其配电母线动态电压曲线有一个比较明显的电压下降，在一段时间后，电压逐步恢复。但对于不同容量的发电机组，其电压降的水平不尽相同，从模拟结果可以看到，小容量发电机组受电动机起动的影响最大。

结论：采用大容量的合用发电机组，可以减小

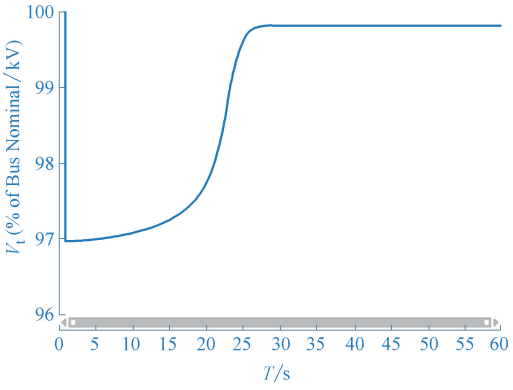

图 7　1 250 kW 发电机组风机起动电压动态曲线

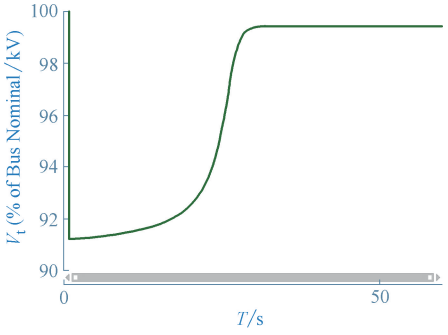

图 8　400 kW 发电机组风机起动电压动态曲线

电动机起动压降对于配电系统的影响。在有条件的前提下，尽量采用大容量发电机组。

结论分析

基于以上的模拟及分析结果，对于 300 m 及以下超高层建筑的柴油发电机组的设置可以得到以下结论：

1）300 m 及以下超高层建筑采用低压发电机组可以满足末端压降要求。

2）200 m 以下超高层建筑变电室建议设置在地下，200~300 m 的超高层建筑，在高区设置变电室对于发电机配电系统电压降更为有利。

3）采用较大容量的发电机组对于减轻不利条件下的系统内电动机起动时的电压降影响更为有利。

除了上述几点设置优化结论外，超高层建筑的柴油发电机组的设置和项目业态、物业管理及项目负荷性质有关。比如高区若规划有酒店业态，相应的高区负荷一般就要设置单独的酒店柴油发电机组。如果地上规划有数据中心，相应的数据中心变电室一般也要单独设置柴油发电机组。**EA**

（收稿日期：2021-05-06）