

[供电系统]

商业综合体供电系统设计探索

文/季华路

华汇工程设计集团股份有限公司

通过对用电负荷特点分析，在设计商业综合体供电系统中，合理选择外部电源，解决柴油发电机作为应急电源时遇到的技术难点。根据积累大量商业综合体设计经验，探讨变压器容量计算时如何对系数进行取值，设计的供电系统如何满足用电负荷的变动。

随着社会经济的高速发展，我国的城市化建设水平日益提高，十几年前仅建在大城市的商业综合体已经如雨后春笋般涌现在中小城市中。商业综合体是集娱乐、休闲、公寓、会所、办公、酒店、饮食及购物于一体的综合建筑，具有综合性、功能性及高效性等特点，能满足城市居民快节奏的生活需求，发挥出现代建筑最大空间价值。由于商业综合体建筑面积巨大，一般都在10万m²以上，单位用电指标高，用电负荷特别大，内部功能十分复杂。如何设计一个安全可靠、符合规范及高效节能的供电系统，是对电气设计师的考验。在此结合两座已完成设计并竣工开业的大型商业广场的设计，探索最优的供电方案。

案例一：浙江某地的万达广场，总建筑面积123 035 m²，其中地上建筑面积75 165 m²，地下建筑面积47 870 m²。购物中心4层、局部5层，功能为零售、餐饮及影院等，特色街区2层、局部3层；地下室2层，为超市、机动车库、人防及设备房。

案例二：浙江某地的吾悦广场，总建筑面积约为241 500 m²，建筑高度为31.55 m。地上建筑面积138 860 m²，其中金街15 000 m²，购物中心123 860 m²。地下建筑面积99 166 m²。购物中心地下共3层，功能为超市、机动车库、人防及设备房。地上5层、局部6层。功能为零售、餐饮、KTV及影院等。

这两个商业综合体无酒店、办公楼等塔楼，属于典型的纯商业广场。

电源的要求

商业综合体用电量大，人员高度密集，对供电可靠性要求高。根据GB 51348—2019《民用建筑电气设计标准》中规定，商业综合体的消防用电设备（含消防控制室内的火灾自动报警及控制设备、消防泵、消防电梯、排烟风机及正压送风机等），火灾应急照明、疏散指示照明，商场及超市的门厅和营业厅的备用照明、航空障碍灯、通信机房、中央监控机房及经营管理用计算机房用电属于一级负荷。其中百货及超市经营管理用计算机系统为一级负荷中特别重要负荷。商场及超市的客梯、扶梯及空调用电，影院的照明及放映设备等属于二级负荷。根据GB 51348—2019《民用建筑电气设计标准》中3.2.8条规定：一级负荷应有双重电源供电，当一个电源发生故障时，另一个电源不应同时受到损坏。

大型商业综合体的装机容量至少在1万kV·A以上，需采用10 kV或20 kV专线供电。电气设计人员在设计前须配合建设单位完成市政调查，了解工程建设地点附近的市政电网情况。如果发现附近电网没有两个上级变电站或富裕容量不够，就应及时提醒建设单位并请当地政府出面协调，要求电力部门尽快完善电网建设，满足本工程两个独立电源供电的要求。

案例一的万达广场在项目建设地点的北面3.5 km和南面4.0 km处各有一座110 kV变电站，容量富裕，能满足本项目的供电要求。案例二的吾悦广场在项

目建设地点的西侧0.5 km有一座10 kV变电站，东面1.5 km处有一座220 kV变电站，容量富裕，能满足本项目的供电要求。

其他商业综合体的设计中，有些项目建设地点较偏僻，附近电网建设不完善，短期内不能提供两个独立的外部电源，而是采用柴油发电机作为应急电源。

商业综合体设置柴油发电机房有许多技术问题需设计时解决。

首先是确定柴油发电机的功率。一级负荷中有消防负荷和非消防负荷，按照设计规范可知，二类性质的负荷不会同时工作，柴油发电机组的功率只要按二者中功率较大的选择就行。根据对多个项目的负荷计算可知，商业综合体的一级负荷中，消防负荷明显大于非消防负荷。商业综合体的应急柴油发电机功率计算见表1。

表1 商业综合体应急柴油发电机功率计算

外界气压、温度、湿度的校正系数B	0.90
发电机所带保障负荷计算功率 $P_{\Sigma 1}/\text{kW}$	30.00
发电机所带消防负荷计算功率 $P_{\Sigma 2}/\text{kW}$	1 002.10
发电机总负荷计算功率 $P_{\Sigma}=\max(P_{\Sigma 1}, P_{\Sigma 2})/\text{kW}$	1 002.10
发电机所带负荷综合效率 η_{Σ}	0.88
发电机额定功率因数 $\cos\varphi$	0.80
按稳定负荷计算发电机的容量 $\text{kV}\cdot\text{A}$ $S_{G1}=P_{\Sigma}/(\eta_{\Sigma}\times\cos\varphi\times B)$	1 581.60
尖峰负荷造成的电压、频率降低而导致的电动机功率下降系数 K_f	0.95
发电机允许短时过负荷系数 K_G	1.50
发电机所带负荷最大电动机的额定功率 $P_{\max}/\text{kW}$	160.00
发电机所带负荷最大电动机的额定电流 I_n/A $I_n=P_{\max}/(\sqrt{3}U\cos\varphi)$	303.87
最大电动机起动方式	星三角起动
起动电压与额定电压比值	0.58
最大电动机的起动倍数K	2.31
最大电动机的起动电流 I_{st}/A $I_{st}=KI_n$	701.94
最大电动机起动时的尖峰电流 A $I_{\text{tr}}=I_{st}+I_c$ I_c 为除最大电动机外的其他负荷的电流	2 301.23
最大电动机的起动时的最大起动容量 $S_m/\text{kV}\cdot\text{A}$	1 514.63
按尖峰负荷计算发电机容量 $\text{kV}\cdot\text{A}$ $S_{G2}=(K_f/K_G)S_m/B$	1 065.85
发电机的暂态电抗 X_d	0.25
母线允许的瞬时电压降 ΔU	0.25
导致发电机最大电压降的电动机的起动容量 $\text{kV}\cdot\text{A}$ $S_{st\Delta}=1\sqrt{3}UI_{st}$	462.00
按发电机母线允许电压降计算发电机容量 $\text{kV}\cdot\text{A}$ $S_{G3}=(1-\Delta U)/\Delta U X_d S_{st\Delta}/c$	385.00
应选发电机容量 $S_G/\text{kV}\cdot\text{A}$	1 581.60
实际选择发电机容量 P_G/kW 及参数	1 265.28

其次，柴油发电机房的位置选择非常重要。商业综合体的柴油发电机房一般设在地下室，根据GB 50016—2014《建筑设计防火规范》5.4.13条要求，柴油发电机房不应布置在人员密集场所的上一层、下一层或贴邻。商场营业厅属于人员密集场所，一层在商业综合体中是价值最高的黄金区域，一般不设置库房、设备用房等人员不密集的房间。地下室的柴油发电机房位置较难选择，在设柴油发电机房的项目设计中，与建筑设计人员协商，扩大地下室范围，使得柴油发电机房设置区域处在建筑轮廓外，柴油发电机房正上方是室外草坪，满足规范要求。

最后，设计中需注意柴油发电机房的层高、进风井、排风井及油箱存储量等要求。功率超1 000 kW的柴油发电机外形尺寸较大，对机房净高的要求超过所处地下室的净高。所以需向土建专业提出要求，通过采取局部降楼板满足工艺要求。柴油发电机一般采用风冷，功率超1 000 kW后，进风量和排风量是很大的，进风面积和排风面积都超5 m²，柴油发电机工作时产生500 C°左右的烟气且需高空排放，如何在不影响建筑的立面形象和内部功能的前提下，设置柴油发电机房的排烟井、进风井和排风井，考验建筑师的专业能力。规范GB 50116—2014《建筑设计防火规范》中5.4.13.4是强制性条款，要求柴油发电机房的储油间内总存储量不应大于1 m³，电气设计师必须按实际需要计算用油量，若大于1 m³，须在室外设埋地式储油罐。

按照GB 51348—2019《民用建筑电气设计标准》中的规定，百货及超市经营管理用计算机系统为特别重要负荷，因负荷不大，在计算机系统配置UPS电源就可满足规范要求。

商业综合体属大型公共建筑，社会影响大，供电可靠性要求高，以巨额投资为代价，增设一条外线，往往增加上千万投资，设置柴油发电机房意味着增加百万投资和一系列技术难题。电气设计师须以国家规范为依据，设置几条外线，是否设柴油发电机房须充分论证，多方比较。在满足供电可靠性的前提下，制定合理经济的供电方案。

变电所的设置

大型商业综合体须设置多座变电所。按照建设

单位的管理要求，有些须独立设置变电所，如商业综合体中的金街，建成后将分割成单铺销售，须单独设变电所，每个铺子再设分户计量表。商业综合体的地下室一般设置大型超市。超市经营方招商引资，要求单独设变电所，案例二中的吾悦广场单独设置了超市变电所。也有超市经营方无此要求，由综合物业变电所供电，案例一中的万达广场建设单位要求超市由物业变电所供电。

商业综合体都设置了大型制冷机房，内有制冷机组、冷冻泵和冷却泵等用电量较大的设备。制冷机房一般独立设置变电所或专用变压器。供电范围明确，方便管理，可以在春秋季节停用变压器，节约电能，符合国家提倡的绿色低碳方针。制冷机房变电所须设置在制冷机房附近，不但节约母线和电缆的造价，还能减少线路损耗。

影院、商铺、地库及其他公共用电一般采用综合物业变电所供电。物业变电所的数量根据供电半径确定。一般大型商业综合体宽度都远超100 m，设置两个物业变电所比较合适。

各变电所内的变压器容量如何选择，最考验电气设计师专业能力。如果容量选择偏小，商业综合体开业后因变压器过负荷而停电，造成重大经济损失和恶劣影响，是一起严重的设计质量事故。如果容量选择过大，商业综合体开业后，变压器负荷率长期偏低，浪费投资，提高运行成本。

JGJ 392—2016《商店建筑电气设计规范》用电指标见表2。

表2 JGJ 392—2016《商店建筑电气设计规范》用电指标

商店建筑名称		用电指标/ (W/m ²)
购物中心 超级市场 百货商店	大型购物中心、超级市场、高档百货商场	100~200
	中型购物中心、超级市场、高档百货商场	60~150
	家电卖场	60~100 (不含空调主机)
	零售	40~80 (不含空调主机)
步行商业街	餐饮	100~250
	精品服饰、日用百货	80~120
专业店	高档商品专业店	80~150
	一般商品专业店	40~80

电气设计师在参照表2选择变压器容量时仍有许多困惑：用电指标上限值与下限值往往差一倍，如何取值影响变压器容量。对外销售的店铺经营范围不确定，用电负荷无法统计。室内步行街在设计

中划分主力店、餐饮铺及百货铺等业态，但后期招商时发现，同样性质的商铺，要求的用电量相差巨大。比如采用电炉烤肉的餐饮铺，要求的用电量是1 kW/m²，远超普通餐饮铺的要求。由于市场竞争激烈，招商难度加大，施工图完成时，招商进度不到50%的情况很普遍，给电气设计师选择变压器容量带来困难。即使统计出了各业态的用电负荷，在计算变压器容量时，怎么取同期系数也无据可查。

制冷机房专用变压器的容量比较容易确定。案例一中的万达广场，制冷机房设有505 kW的离心式冷水机组3台，233 kW的螺杆式冷水机组1台，冷切泵、冷冻泵及其他设备用电量1 050 kW。选用2台2 000 kV·A的变压器，满负荷工作时负荷率为74%。案例二中的吾悦广场，制冷机房设有10 kV供电的585 kW的离心式冷水机组5台，冷切泵、冷冻泵及其他设备用电量992 kW。低压设备选用1台1 250 kV·A的变压器供电，满负荷工作时负荷率为84%。大功率的离心式冷水机是采用10 kV供电还是采用0.4 kV供电合理须多方面考虑。二者优缺点比较见表3。

表3 优缺点比较

	离心式冷水机组投资	配套变配电设备投资	运行费用	配套的变电所面积	控制室面积
10 kV供电	较大	较小	较小	较小	较大
0.4 kV供电	较小	较大	较大	较大	较小

在商业综合体的方案设计阶段，采用单位面积功率法确定计算负荷，在施工图设计阶段采用需要系数法确定计算负荷。案例二中吾悦广场的供电方案阶段估算的变压器容量见表4。

施工图阶段变压器容量与供电方案完全一致。超市招商后，经营方对供电的要求也是2台630 kV·A变压器。金街变电所目前运行的变压器负荷率在50%左右，考虑到部分商铺还未开业，金街的变压器容量选择是合适的。建设单位在招商时，室内步行街许多商铺的经营方提出了很高的用电负荷要求，总用电负荷远超设计预留值，建设单位十分担心物业变电所变压器容量不够，根据经验商业广场物业变电所计算变压器负荷率时，同时系数取0.4~0.5较合适。建议增大楼层总配电箱到单铺的供电线路，但变压器容量不需增加。商业广场开业后，实测物业变电所各变压器负荷率最高为70%~80%，符合设计要求。

表4 案例二估算的变压器容量

序号	变电所名称	供电区域	建筑面积/m ²	功率负荷密度/(W/m ²)	系数K	计算功率P _{js} /kW	视在容量S _v /(kV·A)	装机容量S/(kV·A)		变压器负荷率(%)
1	金街变电所	金街	15 000	250	0.43	1 612.5	1 697.4	2 000	2x1 000	84.87
2	超市变电所	超市	6 800	150	0.80	816.0	858.9	1 260	2x630	68.17
3	右间侧大商业变电所	右侧商业	73 000	130	0.50	4 745.0	5 842.6	7 200	2x1 600 +2x2 000	81.15
		右侧地库	40 000	20	0.50	400.0				
		快充	39	30 000	0.15	175.5				
		慢充	219	7 000	0.15	230.0				
4	左侧大商业变电所	左侧商业	60 200	130	0.50	3 913.0	4 619.5	5 700	2x1 600 +2x1 250	81.04
		左侧地库	47 550	20	0.50	475.5				
5	制冷机房变电所	制冷机房设备	133 200					1 250	1x1 250	
		高压制冷机组						2 925	5x585	

供电系统的设计

为了保证商业综合体供电的可靠性、安全性及经济性，在设计变电所中，10 kV主接线方式为单母线分段，中间不联络。低压主接线采取单母线分段加手动联络方式，电气加机械连锁，平时分列运行，当一台变压器检修或故障时，另一台变压器可带全部一二级负荷。在设计商业综合体供电干线图中，考虑单层面积较大、各商铺用电量招商前不能确定等特点，需按防火分区或供电距离设置多个电气竖井（兼楼层配电间）。案例一的万达广场设置了11个电气竖井，案例二的吾悦广场设置了10个电气竖井。对于较大且已确定的用电负荷，宜采用电缆直接从变电所供电。对于负荷变化大的步行街商铺，可由楼层配电总箱（内设计量电度表）供电。同一电气竖井内的各层楼层配电总箱应采用大规格母线供电，供电干线具有开放性和灵活性，能减小商铺招商后用电量变动后的供电线路更改工作量。

结束语

随着经济的发展和消费形式的变化，商业综合体中餐饮生意火爆，百货铺人流稀少，商业综合体建设单位在新设计的项目中要求加大餐饮铺的比例，并对已建成的商业广场进行改造。EA

（收稿日期：2023-03-01）

参考文献

[1] 中国航空规划设计研究总院有限公司. 工业与民用供配电设计手册[M]. 北京：中国电力出版社，2016.

[2] 电力装置的继电保护和自动装置设计规范：GB/T 50062-2008[S].

[3] 电力变压器能效限定值及能效等级：GB20052-2020[S].

[4] 电力变压器经济运行：GB/T13462-2008[S].

[5] 建筑电气常用数据手册：19DX101-1[S].

[6] 孙雪虹. 关于既有建筑改造工程中电气设计若干问题的探讨[J]. 电气应用，2021，40(5)：72-75.

[7] 常昊，李炳华，王成，等. 商业建筑电气负荷密度调查与分析[J]. 电气应用，2021，40(3)：83-89.

[8] 谭兰平，梁寅，杨绍辉，等. LED光伏照明系统在市政建设中的可行性研究[J]. 电气应用，2021，40(5)：39-43.

[9] 丁雪鹏，吴攀峰. 数据中心20 kV供配电系统及柴油发电机组的设计[J]. 电气应用，2020，39(5)：89-93.

[10] 张雪祁，朱必镛，方波，等. 超大城市综合体消防联动系统设计优化[J]. 电气应用，2021，40(5)：88-94.