

基于配置负载率粒子群寻优的超高层建筑 变压器容量选择

曹 靖

(呼和浩特开投置皓房地产开发有限责任公司)

摘要: 由于超高层建筑用电需求具有明显的阶段性特征,导致变压器负载率波动幅度较大,为此,提出基于配置负载率粒子群寻优的超高层建筑变压器容量选择研究。对于原始的超高层建筑的历史用电数据,利用 ARIMA 模型对其时间序列进行分析后,结合负荷配置构建超高层建筑用电需求模型;综合考虑了变压器的有功功率损耗以及因消耗无功功率对电网造成的额外有功功率损耗,分析确定变压器最佳运行区间,并将其作为目标函数,利用粒子群寻优的方式迭代不同时序下的变压器运行状态,输出最终的变压器容量。在测试结果中,设计变压器容量选择方法下,不仅变压器负载率波动基本稳定在 35.0% 以内,且整体负载率分布相对均衡。

关键词: 配置负载率; 粒子群寻优; 变压器容量; 时间序列; 用电需求模型; 最佳运行区间; 目标函数

0 引言

对于高层建筑而言,由于其复杂的设施布局,包括机房、电梯、办公室、食堂、健身房等,导致用电负荷特别大^[1]。同时,由于室内外温差大,供冷供热需求显著增加,电力负荷需求量在季节和天气变化时会出现较大波动。除此之外,高层建筑的用电负荷在日照时段会出现显著变化,负荷变化范围极大,需要备有大量的安全储备发电能力以应对高用电量负荷要求^[2]。基于上述特征,对变压器容量的选择不仅要考虑到高层建筑的高负载率和波动性,确保变压器具备较大的备用容量,在电力需求高峰时仍能提供稳定的电力供应。同时还要根据历史数据和未来发展趋势,合理确定变压器容量,避免容量过剩或不足^[3]。

在以热点温度仿真为基础的电站变压器容量选择方法中^[4],通过仿真研究冷却器运行对电力变压器绕组热点温度的影响,准确评估变压器在不同工况下的运行状态和散热效果。结合仿真结果,优化变压器的设计和散热系统,提高变压器的运行效率和稳定性,为变压器容量的选择提供科学依据。但是仿真模型的准确性受多种因素影响,如环境温度、冷却器类型、变压器负载率等,因此需要不断验证和调整模型参数。在以需求响应为基础的变压器容量规划方法中^[5],通过调节用户侧的用电行为,有效缓解负荷高峰时的电网运行压力,并深入挖掘需求侧资源的潜力,更加灵活地规划变压器容量,避免了容量过剩或不足问题。但是需求侧响应的效果受多种因素影响,如电价政策、

用户用电习惯、负荷特性等，需要综合考虑多种因素进行规划。

在上述基础上，本文提出基于配置负载率粒子群寻优的超高层建筑变压器容量选择研究，并开展对比测试，分析验证了设计选择方法的应用效果。

1 超高层建筑变压器容量选择设计

1.1 超高层建筑用电需求模型构建

在构建超高层建筑用电需求模型时，本文充分考虑了时间序列和负荷配置两个主要因素。

对于原始的超高层建筑的历史用电数据，本文首先利用 ARIMA 模型对其时间序列进行分析^[6]，具体可以表示为：

$$\phi(B)\Delta^d X_t = \theta(B)\varepsilon_t \quad (1)$$

式中， $\phi(B)$ 和 $\theta(B)$ 分别为自回归和移动平均的滞后多项式； B 为后移算子； Δ^d 为 d 阶差分； X_t 为超高层建筑历史用电数据中的时间序列数据； ε_t 为超高层建筑历史用电数据中的白噪声序列。

在此基础上，考虑到超高层建筑的负荷配置复杂，不同负荷的用电需求存在各自的特性^[7]，因此，本文对其的负荷总需求的计算方式可以表示为：

$$L(t) = X_i \sum P_i \quad (2)$$

式中， $L(t)$ 为超高层建筑的负荷总需求； P_i 为超高层建筑中第 i 个负荷的功率参数。

按照上述所示的方式，结合时间序列和负荷配置，构建超高层建筑用电需求模型，为后续的变压器容量选择提供科学依据。

1.2 变压器最佳运行区间分析

为了确定超高层建筑变压器的经济运行区间，本文综合考虑了变压器的有功功率损耗以及因消耗无功功率对电网造成的额外有功功率损耗^[8]。

根据超高层建筑变压器的负载率、短路阻抗和负载功率因数，确定变压器的有功功率损耗后，在分析

变压器消耗的无功功率如何通过电网的电压调节和输电效率影响电网的有功功率损耗时^[9]，本文构建如图 1 所示的超高层建筑变压器运行状态与负载率关系图。

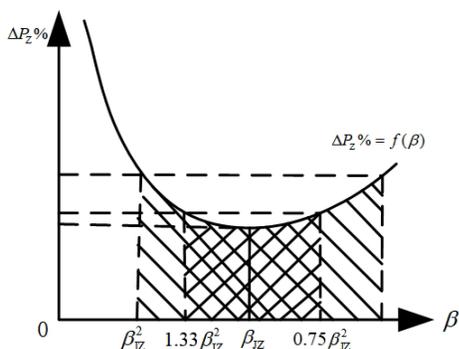


图 1 超高层建筑变压器运行状态与负载率关系图

在图 1 中， β 表示超高层建筑变压器的运行平均负载率参数， β_{IZ} 表示超高层建筑变压器综合功率的经济负载系数值，对应的最佳经济运行区超高层建筑变压器运行负载率上限和下限分别为 $0.75\beta_{IZ}^2$ 和 $1.33\beta_{IZ}^2$ 。结合图 1 所示的信息可以看出，根据超高层建筑历史负荷数据，本文将变压器的负载率划分为多个区间。在每个负载区间内，不同负载率对应不同的综合功率损耗。通过比较各负载区间的综合功率损耗^[10]，即可综合功率损耗最小的区间，即变压器的最佳经济运行区间。其中，超高层建筑变压器综合功率的经济负载系数值的具体计算方式可以表示为：

$$\beta_{IZ} = \sqrt{\frac{P_{0Z}}{K_T P_{KZ}}} \quad (3)$$

式中， p_{0Z} 为超高层建筑变压器综合功率空载损耗； P_{KZ} 为超高层建筑变压器综合功率额定负载功率损耗； K_T 为超高层建筑负载波动损耗系数。

按照上述所示的方式，实现对超高层建筑变压器最佳运行区间的确定，为后续的容量选择提供执行基础。

1.3 基于配置负载率粒子群寻优变压器容量选择

结合上述确定的变压器最佳运行区间以及超高

层建筑自身的用电需求时序特征，本文在开展具体的变压器容量选择过程中，引入粒子群算法（Particle Swarm Optimization, PSO）^[11]。设定粒子的数量 N ，其中，每个粒子代表一个可能的变压器容量配置方案。在此基础上，采用随机的方式初始化每个粒子的位置和速度，对应的位置表示不同的变压器容量值。粒子群寻优的目标函数即在负荷需求下，超高层建筑变压器的负载率稳定在最佳运行区间。对于每个粒子的适应度值，基于图 1 所示的超高层建筑变压器运行状态与负载率关系进行计算。其中，更新每个粒子的速度和位置的方式可以表示为：

$$\begin{aligned}
 v_{i,j}(t+1) &= w \cdot v_{i,j}(t) + c_1 \cdot \text{rand}() \cdot (pbest_{i,j} - x_{i,j}(t)) \\
 &\quad + c_2 \cdot \text{rand}() \cdot (gbest_j - x_{i,j}(t)) \\
 x_{i,j}(t+1) &= x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

式中， $v_{i,j}(t)$ 和 $x_{i,j}(t)$ 分别为粒子 i 在第 j 维上第 t 次迭代的速度和位置； w 为惯性权重； c_1 和 c_2 为学习因子； $\text{rand}()$ 函数生成 $[0,1]$ 之间的随机数。

重复步骤迭代至达到预设的迭代次数或满足不同时序对应超高层建筑用电需求下，变压器运行区间均收敛在最佳区间范围内时，结束输出，将其作为最终的变压器容量选择结果。

通过上述过程，利用粒子群算法确定超高层建筑变压器的最佳容量，以优化负载率和相关运行指标。

2 测试与分析

2.1 测试准备

在测试阶段，针对某超高层住宅项目的电气配置与建筑概况进行分析。测试项目在居民区域的电气规划上展现出高效节能的特点，其居民部分单方电气指标约为 31 VA/m^2 （通过将 4460 kVA 的总电气容量均匀分配至 14.4 万 m^2 居住面积）。就项目整体而言，包括少量商业用途在内，单方电气指标则降至约 30.7 VA/m^2 ，覆

盖整个 21 万 m^2 建筑面积。项目地上建筑面积达到了 15.69 万 m^2 。具体的用电配置数据如表 1 和表 2 所示。

表 1 用电配置数据

| 负荷类型 | 安装容量/kW |
|---------|---------|
| 照明 | 3735 |
| 风机、空调末端 | 4572 |
| 水泵 | 716 |
| 电梯、扶梯 | 1726 |
| 弱电设备 | 530 |
| 充电桩 | 1421 |
| 冷冻机房设备 | 7164 |
| 出租商户用电 | 22010 |

表 2 用户用电配置

| 配置编号 | 用电需求/kW | 配置编号 | 用电需求/kW |
|------|---------|------|---------|
| Q001 | 40 | Q013 | 25 |
| Q002 | 800 | Q014 | 80 |
| Q003 | 7 | Q015 | 130 |
| Q004 | 12 | Q016 | 100 |
| Q005 | 8 | Q017 | 300 |
| Q006 | 35 | Q018 | 180 |
| Q007 | 200 | Q019 | 30 |
| Q008 | 7 | Q020 | 380 |
| Q009 | 15 | Q021 | 113 |
| Q010 | 18 | Q022 | 120 |
| Q011 | 65 | Q023 | 20 |
| Q012 | 8 | Q024 | 9 |

以上述配置情况为基础，开展具体的测试分析。

2.2 测试方案

在变压器配置方面，规划了多台变压器以满足不同区域的用电需求，其中居民区配置了 T1~T6 变压器，T7、T8 变压器服务于非居民区域，以确保了整个项目电力供应的稳定与高效。

针对公变（居民区 T1~T6）与专变（非居民区 T7~T8）的电力使用情况进行分析。其中对于公变系统（服务于 T1~T6 变压器的居民区域），晚间高峰时段（20：30~00：30）是居民用电需求激增的关

键时段，导致变压器峰值最大电流集中出现，该时段内电力调配需特别关注以确保供电稳定。而专变系统（T7~T8 变压器服务于非居民区域），用电的高峰时段集中在日间（8：00~20：30），这一时段内变压器需承受较大的负载压力，峰值最大电流多在此时间段内出现。

在此基础上，分别采用以热点温度仿真为基础的电站变压器容量选择方法，以需求响应为基础的变压器容量规划方法，以及本文设计的变压器容量选择方法作为测试的对照组。通过对比分析不同方法下的供电运行情况，对其具体的容量选择效果进行分析。

2.3 测试结果与分析

对不同方法的容量选择合理性进行分析时，将公变（居民区 T1~T6）与专变（非居民区 T7~T8）的运行状态作为具体的评价指标，对应的数据结果如表 3 所示。

表 3 公变（居民区 T1~T6）与专变（非居民区 T7~T8）负载率情况统计表 /%

| 变压器 | 热点温度仿真选择方法 | | 需求响应规划方法 | | 本文设计容量选择方法 | |
|-----|------------|------|----------|------|------------|------|
| | 最小值 | 最大值 | 最小值 | 最大值 | 最小值 | 最大值 |
| T1 | 12.0 | 45.0 | 20.0 | 42.0 | 18.0 | 43.0 |
| T2 | 16.0 | 59.0 | 26.0 | 53.0 | 12.0 | 42.0 |
| T3 | 13.0 | 66.0 | 15.0 | 52.0 | 16.0 | 47.0 |
| T4 | 25.0 | 45.0 | 22.0 | 59.0 | 13.0 | 33.0 |
| T5 | 26.0 | 52.0 | 19.0 | 58.0 | 12.0 | 46.0 |
| T6 | 13.0 | 46.0 | 26.0 | 49.0 | 15.0 | 52.0 |
| T7 | 9.0 | 55.0 | 23.0 | 56.0 | 19.0 | 50.0 |
| T8 | 10.0 | 46.0 | 22.0 | 48.0 | 15.0 | 43.0 |

结合表 3 所示的测试结果对三种不同容量选择方法下，测试建筑区域公变（居民区 T1~T6）与专变（非居民区 T7~T8）的运行状态进行分析。其中，在以热点温度仿真为基础的电站变压器容量选择方法

下，对应的变压器负载率波动较为明显，最大值幅值达到了 46%（T7）；在以需求响应为基础的变压器容量规划方法下，变压器负载率波动虽然始终稳定在 40.0% 以内，但是整体负载率始终处于相对较高的水平，对应的最小值均在 15.0% 以上。相比之下，在本文设计变压器容量选择方法下，不仅变压器负载率波动基本稳定在 35.0% 以内，且整体负载率分布相对均衡。

3 结束语

变压器容量的合理配置不仅可以提升超高层建筑的供电可靠性。在用电高峰期，能够确保电力供应的稳定性和安全性，避免因变压器过载而导致的停电事故。同时也可以显著降低变压器的能耗，实现节能减排的目标。这对于超高层建筑类能耗大户来说，具有重要的现实意义和长远的社会效益。本文提出基于配置负载率粒子群寻优的超高层建筑变压器容量选择方法研究，该方法利用粒子群优化算法精确配置负载率，对变压器容量进行寻优，使得变压器运行在最优工况下。该方法能够基于实际用电负荷需求，动态调整变压器容量，确保负载率维持在最佳范围，从而最大限度地降低能耗。借助本文对于超高层建筑变压器容量选择的研究，以期为其他类似建筑提供有价值的经验，推动整个行业向更加节能、环保、高效的方向发展。

参考文献

[1] 郭丹春. 浅析大功率电动机启动与变压器容量的匹配 [J]. 现代建筑电气, 2024, 15 (6): 37-42.
[2] 朱乾龙, 李大为, 陶骏. 计及负荷特性的超
(下转第 93 页)

(上接第83页)

- 高层建筑配电网两阶段优化 [J]. 太阳能学报, 2024, 45 (5): 422-430.
- [3] 孔凡武. 大容量集装箱式光伏新能源变压器 SFL-9150/33 的试制 [J]. 电气时代, 2024 (4): 70-75.
- [4] 窦鹏飞. 基于热点温度仿真的光伏电站变压器容量优化 [J]. 电工技术, 2024 (9): 139-141.
- [5] 孙开元, 陈坤, 岑海凤, 等. 计及需求响应的联网型微电网储能容量随机规划方法 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (33): 14241-14247.
- [6] 房雨浓. 投运多台换流变压器时和应涌流波形特点 [J]. 电气应用, 2023, 42 (11): 99-106.
- [7] 沈月青. 基于绿色节能技术对智能建筑中变压器选型的应用 [J]. 智能建筑电气技术, 2023, 17 (5): 92-96.
- [8] 李金阔, 王秀平. 基于循环 BP 模型的变压器状态数据清洗方法 [J]. 电力学报, 2023, 38 (2): 101-109.
- [9] 张学明. 超高层建筑用敞开式立体卷铁心干式变压器的特点分析 [J]. 电工钢, 2022, 4 (5): 42-45.
- [10] 魏泉. 地下车库建筑基于负荷计算的变压器选型分析 [J]. 现代建筑电气, 2022, 13 (9): 51-57.
- [11] 闫峰. 民用智能建筑电气设计中的变压器节能技术与应用 [J]. 低温建筑技术, 2022, 44 (1): 45-48.

(收稿日期: 2024-09-02)