doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2024.03.010

模块化智能变电站精准送风系统能效管理优化策略①

尹康②黄昕颖 李丽 钟婷婷 斯扬华

(浙江华云电力工程设计咨询有限公司 杭州 310000)

摘要 针对现有模块化智能变电站中智能控制柜内部环境控制不均衡、存在局部温度 超出设备安全运行范围且较少考虑能效的问题,提出一种模块化智能变电站精准送风系 统能效管理优化策略。首先建立空调系统热交换和管道系统空气流量数学模型,在此基 础上以控制系统运行能耗最低为目标函数,提出了精准送风系统能效管理优化方法。采 用高效的求解器 CPLEX 求解,得到能耗最低的控制策略。并通过 ANSYS Icepak 进行稳 态过程分析,验证了系统运行的稳定性。结果表明所提方法能够实现对智能控制柜内部 环境的精准控制,达到了系统绿色低碳运行的目的。

关键词 模块化智能变电站;精准送风系统;温湿度控制;能效管理;稳态过程分析

随着智能变电站模块化建设的深入开展,智能 终端、合并单元等设备的"就地安装"对智能控制柜 内环境如环境温湿度、抗电磁干扰能力等提出了更 高要求^[1-2]。国家电网公司智能变电站模块化建设 2.0版技术导则中提出采用精准送风系统实现智能 控制柜柜内温、湿度调节性能要求^[3]。在运行过程 中,精准送风系统需要保证智能控制柜内的温湿度 保持在智能控制柜技术规范规定的范围内^[4]。开 展智能变电站户内智能控制柜精准送风系统的研 究,可以保证智能控制柜内部运行环境负荷运行需 求^[5-6],保障电力系统安全稳定运行。

目前针对智能变电站智能控制柜内部环境和能效管理的研究较少。文献[7]提出了基于 Arduino 控制器的温度比例积分微分(proportional integral derivative, PID)算法,并通过脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)调制技术实现控制柜的温控调节。文献[8]设计了一种基于可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)的变压器智能风冷控制系统,优化了冷却风机的控制策略,在此基础上设计了一种基于智能变电站户外控制柜环境

调节一体化装置。文献[9]提出了一种智能控制柜 双半导体制冷器(thermoelectric cooler,TEC)空调控 制方法,该方案将空调分为两部分,采用联动旋转系 统,验证了室外控制柜在该方案下单一的散热和除 湿效果。文献[10]提出了一种最小化组件互连和 柜内热对流所用的总导线长度为目标函数,利用 Pareto模拟退火算法求解多目标的优化方法,确定 了控制柜运行过程中产生热量的部件的最佳位置。

通过以上文献分析可知,现有控制策略多集中 于单一温度或湿度控制方案的局部改进,在具体实 施应用过程中存在以下诸多问题:(1)现有的温控 方式控制不均衡,存在局部区域温度超出设备安全 运行范围的可能性;(2)目前针对智能柜温湿度控 制的模型均未考虑柜内的设备布置对柜内温湿度分 布的影响,且未综合考虑各因素对系统出力与功耗 的影响;(3)现有的智能控制柜内部环境控制策略 大多数未考虑系统能效问题。

综上,针对以上问题,本文提出了一种模块化智 能变电站精准送风系统能效管理优化策略。首先给 出了控制系统拓扑图,并建立了系统热交换模型和

① 国家自然科学基金青年科学基金(52005442),国家电网有限公司总部科技项目(GC71-20-007)和35-220kV模块化建设变电站设计技术深化及建设成效体系研究(SCSDJY00SJJS2000043)资助项目。

② 男,1984年生,硕士,高级工程师;研究方向:电力系统保护与控制,新能源,电力系统数据挖掘;E-mail:13197491@qq.com。 (收稿日期:2023-07-25)

管道系统空气流量模型;然后在此基础上以精准送 风系统运行能耗最低为目标函数,提出了精准送风 系统控制策略优化方法,并基于求解器 CPLEX 求解 得到能耗最低的控制策略。通过 ANSYS Icepak 进 行稳态过程分析,验证结果表明所提方法能够实现 能耗最低的同时对智能控制柜内部环境实现精准控 制。

1 精准送风系统拓扑及数学模型

1.1 精准送风系统拓扑

模块化智能变电站精准送风系统由空调热交换 系统、管道系统和检测、执行控制系统等组成,通过 实时检测智能控制柜内外温度、湿度,调整风阀、空 调运行模式及送风量,实现智能控制柜温湿度精准 控制,同时防范冷凝发生。

为了综合考虑柜内设备布置对柜内温湿度分布 的影响,防止出现局部温度超出设备安全运行范围, 模型针对柜内发热源布置位置、风道的走向与口径 均进行了精细化建模与配置,使之与工程实际场景 更加贴近。具体如图1所示。



图1 精准送风系统拓扑图

1.2 精准送风控制系统

(1) 空调运行功率模型

 $P_0 = \lambda \varepsilon_1 \sigma V L_0 t [(T_1^4 - T_2^4) + (T_1^4 - T_3^4)]$ (1) 式中, P_0 表示空调系统运行消耗功率; λ 为拟合系 数; ε_1 为物体的发射率,如碳钢发射率为0.23; σ 为 斯忒藩-波尔兹曼常量,即通常说的黑体辐射常数, 为5.67×10⁸ W·m⁻²K⁻⁴); V 为柜体体积;t 为空 调开启时间; L_0 为孔口流出风量; T 为物体表面热 力学温度(K),其中假设 T_1 为柜体表面温度, T_2 为 柜内环境温度, T_3 为环境温度。

(2)空调制冷容量

柜内布置的智能设备热耗功率之和为 P₁, 柜体 与周围环境大气辐射换热功率为 P₂, 风道与周围环 境大气辐射换热率为 P₃, 计算公式如下:

 $P_{2} = \varepsilon_{1} A_{1} \sigma (T_{1}^{4} - T_{2}^{4})$ (2)

$$P_{3} = \varepsilon_{1} A_{2} \sigma (T_{1}^{4} - T_{2}^{4})$$
(3)

式中, A_1 为辐射表面积(m²), A_2 为风道表面积(m²)。

为达到柜内环境的控制目标,根据电子设备可 靠性热设计手册,柜内空气流量的估算如式(4)所 示。

$$Q = C_P \times Q_V \times \rho \times \Delta t \tag{4}$$

空气单位时间内吸收的热流量 Q_v 为

$$Q_{\nu} = \frac{Q}{C_{\nu} \times \rho \times \Delta t} \tag{5}$$

$$Q_V = Q_1 + Q_2 \tag{6}$$

式中, Q_v 为发散的最大热量之和, Q_1 为柜内设备功 耗, Q_2 为单台柜体辐射换热功率, C_p 为定压空气比 热; ρ 为空气的密度; Δt 为允许的温升。

(3) 空调制热容量

机柜对柜内环境温度辐射 P₄、风道与柜内环境 辐射换热率 P, 计算公式为

$$P_{4} = \varepsilon_{1} A_{1} \sigma (T_{1}^{4} - T_{2}^{4})$$
(7)

$$P_{5} = \varepsilon_{1} A_{2} \sigma (T_{1}^{4} - T_{2}^{4})$$
(8)

(4)空调容量的初始值选择

根据以上理论,考虑到柜体的实际制造间隙,实际空调选型时还应考虑实际柜体保温层不可能达到 仿真时的理想水平,基于冗余设计原则应该考虑一 定的功率补偿。在计算的基础上再采用适当的放大 系数,文中放大系数的初始赋值为1.2,经参数化计 算后再调整该系数的具体值。

$$P_{\gg} = 1.2 \times P_0 \tag{9}$$

$$P_{\pm} = 1.2 \times P_{\pm} \tag{10}$$

1.3 管道系统空气流量模型

管道系统主要包括从空调引出的送风风道和导

回空调的回风风道。主风道安装于电缆夹层顶部或 风道沟内,送风风道和回风风道间应避免穿越和纠 结,减少风道长度和拐弯,以减少风速在管道内损 失^[11-12]。管道分布如图2所示。



图 2 管道系统分布示意图

空气在风管内流动时,其静压垂直作用于管壁。 如果在风管的侧壁开孔,由于孔口内外存在静压差, 空气会按垂直于管壁的方向从孔口流出,侧孔出流 状态如图 3 所示。



图 3 侧孔出流状态图

静压差产生的流速为

$$v_i = \sqrt{\frac{2P_i}{\rho}} (m/s) \tag{11}$$

空气在风管内的流速为

$$v_d = \sqrt{\frac{2P_d}{\rho}} (m/s) \tag{12}$$

式中, P_i 为风管内空气的静压(Pa); P_d 为风管内空 气的动压(Pa)。

因此,空气从孔口流出时,它的实际流速和出流 方向不只取决于静压产生的流速和方向,还受管内 — 314 — 流速的影响。在管内流速的影响下,孔口出流方向 要发生偏斜,实际流速为合成速度。相关参数的计 算如下所述。

孔口出流方向:孔口出流与风管轴线间的夹角 α(出流角)为

$$tg\alpha = \frac{v_i}{v_d} = \sqrt{P_i/P_d}$$
(13)

孔口实际流速 v 为

$$v = \frac{v_i}{\sin\alpha} \tag{14}$$

孔口流出风量 L₀ 为

$$L_0 = 3600\mu \cdot f \cdot v \tag{15}$$

$$f = f_0 \sin \alpha = f_0 \frac{v_i}{v} \tag{16}$$

$$v_0 = \frac{L_0}{3600f_0} = \mu \cdot v_i \tag{17}$$

式中, μ 为孔口的流量系数;f为孔口在气流垂直方向上的投影面积(m^2), f_0 为孔口面积(m^2); v_0 空气在孔口面积 f_0 上的平均流速。

断面不变的矩形送(排)风管,采用条缝形风口送(排)风时,风口上的速度分布如图4所示。



图 4 条缝口吹出和吸入的速度分布

在送风管上,从始端到末端管内流量不断减小, 动压相应下降,静压增大,使条缝口出口流速不断增 大;在排风管上则是相反,因管内静压不断下降,管 内外压差增大,条缝口入口流速不断增大。

可以看出,对侧孔面积保持不变的均匀送风管, 要使各侧孔的送风量保持相等,必需保证各侧孔的 静压和流量系数相等。

2 精准送风系统能效管理优化模型

2.1 目标函数

定义柜内环境控制系统能耗最低为优化目标函 数,可以表示为

$$\min P = \sum_{t=1}^{T} P_0 \tag{18}$$

式中, P 为空调系统运行的总功率; t 为运行起始时间; T 为运行终止时间, 文中 T 为 24。

2.2 约束条件

(1)空调系统功率约束

制冷工况下室内柜体热源主要来自智能化设备的热耗及大气环境对机柜的辐射,因此需满足:

$$P_0 > P_1 + P_2 + P_3 \tag{19}$$

由于是户内场景,该部分忽略了太阳辐射的影响,因 此需满足:

 $P_0 + P_1 > P_4 + P_5 \tag{20}$

(2)空调系统温度约束

$$T_{\min} \le T_2 \le T_{\max} \tag{21}$$

式中, T_2 为控制柜内实时运行环境温度, T_{min} 为控制柜内运行环境最低温度, T_{max} 为控制柜内运行环境最低温度, T_{max} 为控制柜内运行环境最高温度。根据智能变电站所在区域温度, 户内智能控制柜温度控制在 5~35 % 为宜。

(3)空调系统湿度约束

由于本方案总体采用柜内空气内循环的方式, 因此通过空调对系统内的绝对湿度进行控制是比较 理想的方式。在正常工作情况下通过空调除湿模式 可以较好地控制柜内空气的含湿量,避免凝露的发 生^[13-14]。但当现场需要开启柜门时,由于柜内空气 与柜外空气具有一定的温差,柜外空气进入柜内具 有发生凝露的风险,因此要求:

| $T_1 - T_2$ | ≤ T_h (22) 式中, T_h 为保证无凝露的温差。针对这一工作场景 需求, 柜内的温度控制不能太低, 其柜内温度与柜外 温度差小于 15 ℃ 为宜。

(4)管道系统出流角约束

孔口出流与风管轴线间的夹角 α(出流角)应 满足其物理结构,因此要求:

$$0 \le \alpha \le 90^{\circ} \tag{23}$$

3 控制策略和模型求解

3.1 控制策略

智能控制柜内部环境控制系统应由综合控制 器、温湿度传感器等信号采集元件、电动风量调节阀 等执行器以及配套的控制、动力电缆等组成。综合 控制器具备硬接点开入开出功能,也可提供 RS485 通信接口。控制系统可实时监测室内及各智能控制 柜内的温湿度数据及空调设备的运行状况。根据预 设的温控范围^[15-16],通过调节风管支管上的风量调 节阀控制风量进而保证各个智能控制柜内温湿度在 设置的区间内。

空调启动时宜先采用除湿模式对智能控制柜内 进行除湿,之后再切换至送风、制冷或制热模式。控 制系统应根据检测到的温湿度状况计算凝露温度, 并通过绝对湿度的控制避免凝露的发生。运行控制 策略决定着智能控制柜的运行模式与流程,直接影 响智能控制柜的工作情况^[17]。文中所提的智能控 制柜内部环境控制策略流程如图5所示。



图 5 控制策略流程图

其中,空调系统的运行状态包括制冷、制热和送风3 种模式,实际运行时采用的模式由控制系统判断,实 际的运行参数由 CPLEX 求解器进行多目标优化求 解,所得到的结果即为系统运行的最小能耗的控制 参数。

3.2 模型求解

YALMIP 是 Matlab 的一个工具箱,可自动根据 用户所要求解问题的种类选择合适的求解器,无须 针对每一种算法建立相应的模型。文中将考虑运行 能耗最低的运行控制模型转化为整数线性规划问 题,从而可利用 YALMIP 建模并调用 CPLEX 求解器 进行求解。所涉及的 MILP 问题可以描述为

$$\min P(t, y) \tag{25}$$

s.t.
$$\begin{cases} h_i(t, y) = 0 & i = 1, 2, \cdots, m \\ h_i(t, y) \le 0 & j = 1, 2, \cdots, n \end{cases}$$
 (26)

式中, P 为目标函数, h_i 为等式约束, h_j 为不等式约 束, t 和 γ 分别为时间和输入变量。

系统运行控制实现的伪代码如算法1所示。

算法1 精准送风系统运行控制
输入:系统初始化参数
输出:系统优化结果
程序:
/* 第1阶段:送风除湿/*
启动空调时,先对智能控制柜进行除湿模式的除湿
再切换至送风、制冷或制热模式。
/* 第2阶段:优化求解/*
内部温度、外部温度=控制柜内外温度;
内部湿度、外部湿度=控制柜内外湿度;
如果满足式 (21)~(22),则
连续测量是否满足约束条件;
如果不满足式(21)~(22),则
利用式(18)、(19)~(23)建立优化目标函数;
基于 CPLEX 求解器的多目标优化求解模型;
控制系统执行指令。

4 算例分析

4.1 典型仿真场景

精准送风系统的主机选用高能效的工业单元式 空调机,一备一用。空调柜体采用高强度钣金材料, 表面涂敷环保防腐蚀涂料,牢固耐腐蚀。空调内部 进行减震隔音处理,有效降低运行中的振动和噪音。 选取控制柜某天的环境温度时间序列和控制柜表面 温度时间序列作为系统输入数据,仿真步长设置为 1 h。其中,智能设备热耗功率之和为1 800 W。场景 1 为需要制冷的典型日,场景 2 为需要制热的典型 日,2种场景下以1h为步长选取典型日的环境温度 和柜内的测量温度为输入进行优化求解。在运行过 程中,智能控制柜内的温湿度需保持在智能控制柜 技术规范规定的范围内。智能控制柜、空调系统和 管道系统的部分参数见表1。

表1 控制系统参数

项目	参数	数值
智能控制柜	控制柜表面积/m ²	8.32
	控制柜体积/m ³	1.408
	设备热耗功率/W	1 800
空调系统	物体的发射率	0.23
	定压空气比热/J・kg ⁻¹ K ⁻¹	1 004
	空气的密度/(kg・m ⁻³)	1.185
	额定功率/W	6 000
	送风量/(m ³ ・h ⁻¹)	1 500
管道系统	风道表面积/m ²	27.312

4.2 优化结果分析

通过优化配置得到场景1和场景2下控制柜的 优化控制方案,如图6和7所示。由图可知,2种场 景下优化结果给出不同温度下的制热和制冷量。







4.3 稳态过程仿真分析

稳态过程仿真是指在 2 种典型仿真场景下,一 定功率的空调系统通过送风、制冷及制热工作模式 使柜内环境温度保持稳定状态的仿真过程^[18]。采 用下进上出内循环精准送风模式,仿真软件为 AN-SYS Icepak。仿真方案的柜体模型主要尺寸参数 为:柜体总体尺寸 2.2 m×0.8 m×0.8 m,进风口 10.1 m×0.2 m×0.2 m,出风口 10.6 m×0.2 m× 0.23 m。柜体主要材料普通碳钢的热学性能参数为: 导热系数 36 W/(m・K)、表面发射率 0.9。为增强 柜体在极端环境温度下自身的保温性能,模型在风 道的壁面配置了 10 mm 厚的 PU 发泡板,其 PU 材料 热学性能参数为:导热系数0.025 W/(m・K)、比热 1.38 J/(kg・K)、密度32 kg/m³。其中稳态仿真逻辑 如图 8 所示。





(1)制冷场景

空调6000 W 制冷量条件下柜内温差在3℃左 右,且柜内环境平均温度在32℃左右,实现了柜内 温度均衡控制。制冷工况下的进风风道切面、回风 风道切面温度分布分别如图9、图10所示。

(2)制热场景

空调6000 W 制冷量条件下柜内温差在2℃左 右,且柜内环境平均温度在6℃左右。制热工况下 的进风风道切面、回风风道切面温度分布如图11、 图12 所示。

由仿真实验结果可以看出,在制冷场景下,回风 风道温度高于进风风道,但温度都保持在35℃以 下。在制热场景下,回风风道温度低于进风风道,有 局部点温度低于设置的范围区间,但平均温度保持 在5℃以上。2种场景下温度差都保持在允许的范 围内,可以有效地防止冷凝的发生。

当控制系统监测温度超过35℃时,控制系统开 启制冷;当控制系统监测温度低于5℃时,控制系统 开启制热,并根据不同的温度给出功耗最低的制冷 和制热量。实验结果证明了文中所提智能控制柜温 湿度优化配置的有效性,该策略能够合理地给出不 同环境下的控制参数与运行模式,实现了系统运行 的功耗最低,从而保证了系统运行的经济性。



图 9 制冷工况下的进风风道切面温度分布图



图 10 制冷工况下的回风风道切面温度分布图



图 11 制热工况下的进风风道切面温度分布图



图 12 制热工况下的回风风道切面温度分布图

5 结论

智能变电站精准送风系统的温湿度优化配置不 仅能够充分对环境温度做出决策,同时也能保证系 统运行的经济性。本文建立了空调系统热交换模型 和管道系统空气流量模型,提出了以能耗最低为目 标的精准送风系统温湿度控制策略优化方法,利用 CPLEX 求解器进行求解,并通过 ANSYS Icepak 进 行稳态过程的分析,验证了系统运行的有效性。

具体结论如下:(1)采用优化配置的方法对智 能控制柜的温湿度进行调节,得到最小能耗目标函 数值下的优化配置方案;(2)通过 ANSYS Icepak 进 行稳态过程分析,验证了系统能精准控制柜内的温 湿度,实现了柜内温度均衡控制。

参考文献

- [1] 陈家健, 刘艳春. 户外二次设备环境适应性研究[J]. 江西电力, 2020,44(2):32-39.
- [2] 黎鹏,黄道春,阮江军,等. 10 kV 开关柜开断对二次 智能设备的电磁干扰[J]. 电网技术, 2015,39(1): 110-117.
- [3] 国网基建部. 变电站模块化建设 2.0 版技术导则
 [EB/OL]. (2021-12-01) [2023-07-22]. https://xy 318 —

cost. com/archives/213442.

- [4] 国家电网公司.智能变电站智能控制柜技术规范:Q/GDW 430-2010[S].北京:国家电网公司,2010.
- [5]田宇,赵恒阳,柯艳国,等.智能变电站智能控制柜 散热策略研究[J].电气应用,2020,39(6):40-45.
- [6] PAN L, LI H, WANG J. Study on temperature adjustment system of intelligent shore-based electrical cabinet and its control [C] // 2018 Chinese Control and Decision Conference. Shenyang, China: IEEE, 2018:6662-6667.
- [7] 陈飞荣. 基于 Arduino 应用于控制柜节能降本的温度 PID 算法控制[J]. 现代制造技术与装备, 2020(5): 73-75.
- [8]谢安平,宁放新.基于 PLC 的大型变压器智能风冷控制柜的研究[J]. 唐山师范学院学报,2016,38(5): 65-67.
- [9] LI H, ZHOU T, ZHU W J, et al. Design and realization of double TEC air conditioning for outdoor intelligent control cabinet [C] // 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Changsha, China; IEEE, 2019;2308-2313.
- [10] PLLANA S, MEMETI S, KOLODZIEJ J. Customizing Pareto simulated annealing for multi-objective optimization of control cabinet layout [C] // 2019 22nd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS). Bucharest, Romania: IEEE, 2019:78-85.

- [11] 程显,韩书谟,何周,等. 40.5 kV 环保型气体绝缘开 关柜气室结构设计[J].高电压技术,2015,41(8): 2772-2779.
- [12] 黄新波,方寿贤,王霄宽,等.基于物联网的智能高 压开关柜设计[J].电力自动化设备,2013,33(2): 147-151.
- [13] HU J L, LI YA Y, LAI J J, et al. Analysis of condensation problem in high voltage switch gear and design of anti-condensation system [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021,1754: 012032.
- [14] 潘岐泽,杨芳,杨志. 12 kV 高压开关柜受潮凝露机理 及防治关键技术探讨[J].电力系统保护与控制,

2019,47(5):160-172.

- [15] 周文文. 外覆绝缘材料的高压开关柜接头温度监测技术[J]. 电器与能效管理技术, 2021(4):46-51.
- [16] 张志锋, 缪希仁, 江灏. 基于面阵测温的高压开关柜 温度状态监测系统研究[J]. 电器与能效管理技术, 2021(3):51-56, 75.
- [17] 田小壮,张博文,石辉,等.智能变电站智能控制柜
 温控系统选型对比[J].甘肃科技,2019,35(20):32-34.
- [18] 冯双昌,梁艳春,陈杰. 基于红外热像仪的控制柜温 升监测试验研究[J]. 机械工程师,2022(4):10-12, 16.

A low energy control strategy for precise air supply system of modular smart substation

YIN Kang, HUANG Xinying, LI Li, ZHONG Tingting, SI Yanghua

(Zhejiang Huayun Electric Power Engineering Design Consulting Co., Hangzhou 310000)

Abstract

In the existing modular smart substations, the internal environment control of the intelligent control cabinet is not balanced, the local temperature exceeds the safe operating range of the equipment, and the energy efficiency is rarely considered. In this paper, an energy efficiency management optimization strategy for precision air supply system of modular smart substations is proposed. Firstly, the mathematical models of heat exchange and air flow in the air conditioning system and the air flow in the pipeline system are established. On this basis, the optimization method of energy efficiency management of the precision air supply system is put forward, taking the minimum energy consumption of the control system as the objective function. The efficient solver CPLEX is used to obtain the control strategy with the lowest energy consumption. The steady-state process analysis is carried out by ANSYS Icepak, and the stability of the system operation is verified. The results show that the proposed method can achieve accurate control of the internal environment of the intelligent control cabinet, and achieve the purpose of green and low-carbon operation of the system.

Key words: modular smart substation, precision winding system, temperature and humidity control, low energy consumption, stable process analysis