

[线路损耗]

考虑线路损耗的数据中心变配电系统优化设计

文/杨树树
中通服咨询设计研究院有限公司

常规的变配电系统优化以多种子功能集成优化为主，技术复杂度较高，增加系统优化成本。因此，研究考虑线路损耗的数据中心变配电系统的优化设计。硬件方面，设计时变噪声滤波器、在线式UPS电源。软件方面，建立数据中心变配电系统图元库，模拟数据中心变配电配置与布局。

数据中心作为数字经济的核心设施，不仅支撑了海量数据的存储任务，还支持变配电系统、人工智能和电力系统等技术的应用，为人们提供生活便捷服务。数据中心变配电系统包括高低压配电系统、发电机系统、自动转换开关系统和UPS列头配电系统等部分，能够保证数据中心的正常运行。目前，部分数据中心变配电系统在设计和运行时，未能充分考虑能源效率和能耗问题，导致电能浪费和能源成本增加。针对此类问题，研发多种系统优化方法。

其中，基于人工智能与大数据技术的数据中心变配电优化系统，利用大数据技术分析并挖掘数据中心的信号，再结合人工智能技术，自动调整设备参数，实现数据中心的可靠运行。但是，该系统的安全成本较高，影响系统运行的经济效益。基于人工智能计算的数据中心变配电优化系统，利用人工智能算法处理数据，并设计合理的供配电结构，实现稳定的电力供应。但是，该系统的适应性与可扩展性不良，影响数据安全。因此，本文将线路损耗的问题考虑在内，设计了数据中心变配电优化系统。

硬件设计

1. 时变噪声滤波器

时变噪声滤波器能够根据信号的时变特征，自

动调节滤波器带宽。在尽可能保留信号能量的同时，去除大部分噪声，满足变配电系统的运行需求。滤波器技术参数见表1。

表1 滤波器技术参数

类别	参数	类别	参数
f_0	$f_0=(f_1+f_2)/2$	VSWR	VSWR=1:1, 失配时VSWR>1
f_c	1dB/3dB	RL	端口信号输入功率与反射功率之比的分贝(dB)数
BW × dB	$BW \times dB=(f_2-f_1)$	K × dB	$K \times dB=BW \times dB/BW_{3dB}$
FBW	$BW_{3dB}/f_0 \times 100\%$	T_d	$T_d=df/dv$
IL	中心或截止频率处损耗表征	φ_L	滤波器对通带内传输信号引入的相位失真大小
Ripple	1 dB/3 dB	Q	$Q=w_0/\Delta w$
Passband Ripple	1 dB	Stopband Rejection	≥ 0.9

表1中， f_0 为滤波器通带的中心频率； f_1 、 f_2 为带通或带阻滤波器左、右相对下降1 dB或3 dB边频点； f_c 为截止频率；BW × dB为需要通过的频谱宽度；FBW为滤波器通带带宽；IL为滤波器的引入对电路中原有信号带来的衰耗；Ripple为插损频率在损耗均值曲线上波动的峰-峰值；Passband Ripple为通带内插入损耗随频率的变化量；VSWR

为带内驻波比；RL为回波损耗； $K \times \text{dB}$ 为矩形系数； T_d 为信号通过滤波器所需要的时间； ϕL 为带内相位线性度； Q 为品质因数；Stopband Rejection为阻带抑制制度。

2. 在线式UPS电源

在线式UPS电源能够为数据中心提供不间断电源，利用逆变器转换电流，给数据中心负载使用，实现恒定与干净的电源输出。在线式UPS结构如图1所示。

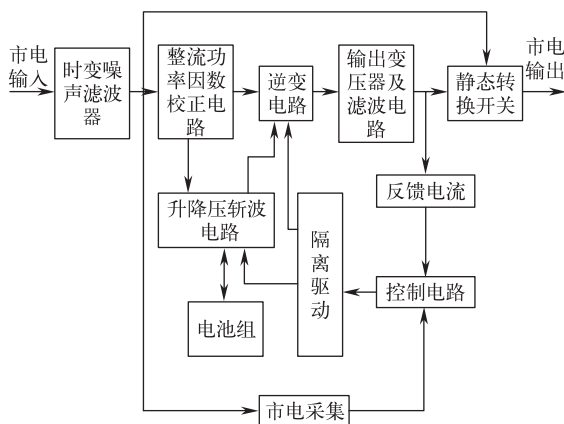


图1 在线式UPS结构图

当电网供电正常时，经过噪声滤波器去除高频干扰之后，整流器整流、滤波，实现稳定的电能输入。

软件设计

1. 建立数据中心变配电系统图元库

根据收集到的信息，为每种电气设备定义唯一的图元标识、名称、型号和规格等属性。将能源供应设备、电力转换与分配设备、电力传输设备、电力控制设备、无功补偿设备集成到图元库中，便于绘制并模拟数据中心变配电配置与布局。常用类图元库如图2所示。

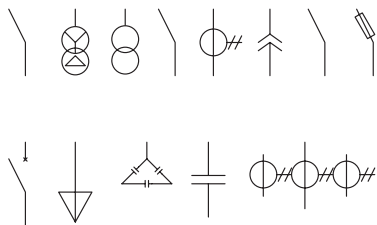


图2 常用类图元库

常用类图元库中，包括但不限于电源、功率放大器、电阻、电感、开关、二极管、晶体管、继电器、

变压器、电机、传感器和集成电路等方面，能够形成各种配置与布局，满足数据中心供配电需求。

2. 考虑线路损耗优化配置变配电系统补偿容量

根据变配电的无功需求，选择电容器组进行分组投切，实现对供电系统的动态补偿与调节。全年电能损失表示为

$$F_1 = \sum_{i=1}^N P_i \times t_i \times K \quad (1)$$

式中， F_1 为全年电能损失； P_i 为*i*时段的线路损耗； t_i 为时段时长； K 为电价； N 为全年划分的时段数。

各个补偿点的优化成本为

$$F_2 = \sum_{i=1}^k (Q_i \times C_i) \quad (2)$$

式中， F_2 为各个补偿点的优化成本； Q_i 为*i*节点的安装容量； C_i 为*i*节点单位容量的补偿成本； k 为补偿点数。

变配电系统补偿设备自身损耗表示为

$$F_3 = \sum_{i=1}^k (Q_i \times P_i \% \times K) \quad (3)$$

式中， F_3 为变配电系统补偿设备自身损耗。

优化后的补偿容量表示为

$$\begin{cases} Q_a = F_1(P_a) + F_2(P_a) + F_3(P_a) \\ Q_b = F_1(P_b) + F_2(P_b) + F_3(P_b) \end{cases} \quad (4)$$

式中， Q_a 、 Q_b 为无功补偿容量的投切范围； P_a 为有功补偿； P_b 为有功投切量。 $F_1 + F_2 + F_3$ 为变配电系统的优化总成本，总成本越低，优化性能越佳。

系统测试

为验证本文设计的系统是否满足数据中心变配电系统优化需求，对上述系统进行了测试。最终的测试结果则以基于人工智能与大数据技术的系统、基于人工智能计算的系统，以及本文设计的考虑线路损耗的系统进行对比的形式呈现，测试过程以及最终的优化结果如下。

1. 测试过程

本次测试在4种模式下进行。模式一：19:00—07:00，光伏发电未具体运行条件，虽然太阳光照逐渐增加，但电源的间歇性较高，负载性能下降，使用IT负载与储能状态充电。模式二：07:00—15:00，正常天气状态，光伏发电达到最佳运行条件，市电关闭，IT负载供电，不间断电源能够保持

其可用性。模式三：15:00—18:00，光伏系统具备运行条件，但运行环境逐渐不良，市电持续关闭，储能装置配合光伏系统为IT负载供电。模式四：市电中断、光伏能量不足，模式一~三无法承担负荷需求，储能装置为主要能源，为峰值功率提供缓冲，实现变配电系统的稳定运行。测试过程中，变压器负荷变化情况见表2。

表2 变压器负荷变化

房间	用电设备	设计功率/kW	使用功率/kW	线损/kW
402机房	R12微模块	87	696	12.6
402机房	R18微模块	130	1040	11.2
502机房	R18微模块	130	1040	15.4
6F会议室	办公用电	10	10	12.3
新风机房6-1	新风用电	30	30	10.5
新风机房6-2	新风用电	30	30	11.3
15#低压房	风冷空调	8	16	12.6
16#低压房	风冷空调	8	16	11.8

本次测试的数据中心存在机房、会议室和低压房等房间，用电设备较多，负荷多分布在一层。变压器布置在6层，每次变配电系统运行，线损均较高，增加了系统运行成本。

2. 测试结果

在上述测试条件下，随机选取出了0.0~1.0个Sample based，其中，模式一的Sample based中， $T=0.400$ ；模式二的Sample based中， $T=0.505$ ；模式三的Sample based中， $T=0.508$ ；模式四的Sample based中， $T=0.502$ 。由此得到变配电蓄电池组电流测试结果，如图3所示。

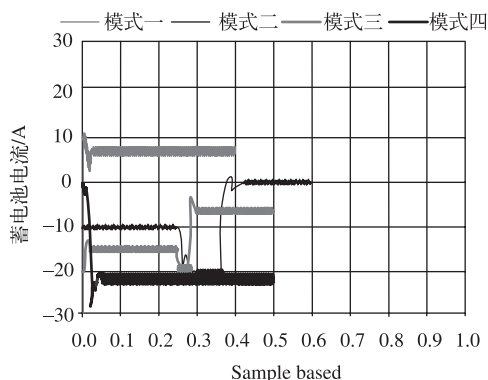


图3 四种模式下的变配电蓄电池组电流测试图

模式一在Sample based=0.03的位置上，电流达到稳定；模式二在Sample based=0.42的位置上，

电流达到最终的稳定；模式三在Sample based=0.3的位置上，电流达到最终的稳定；模式四在Sample based=0.05的位置上，电流达到稳定。由此可见，优化后的系统，变配电电流较为稳定，运行效果好。在其他条件均已知的情况下，对比基于人工智能与大数据技术的系统优化性能、基于人工智能计算的系统优化性能，以及本文设计的考虑线路损耗的系统优化性能。测试结果见表3。

表3 测试结果

系统类别	负载率(%)	线路损耗/kW	节能率(%)	谐波抑制/dB	冗余配置
人工智能与大数据	30	13.6	4.6	20	N+1
	60	17.2	2.2	22	3N
	90	20.8	0.8	18	3N
人工智能计算	30	7.4	14.5	60	2N+1
	60	8.6	11.2	58	3N
	90	10.2	8.7	60	3N+1
考虑线路损耗	30	3.2	38.6	102	2N+1
	60	4.1	35.5	98	2N
	90	5.6	32.1	100	2N+1

谐波抑制性能是对谐波抑制的能力，谐波智能值越高，谐波对变配电设备的干扰越小，系统运行越稳定。冗余配置存在N+1、2N、2N+1、3N、3N+1等方面，冗余配置越高，成本越高；冗余配置越低，系统稳定性越低。因此，冗余配置在2N、2N+1较为适宜。在其他条件均一致的情况下，使用基于人工智能与大数据技术优化后的数据中心变配电系统，节能率较低，冗余配置成本较高，无法满足系统优化需求。使用基于人工智能计算优化后的数据中心变配电系统，仍存在冗余配置较高的问题，系统优化成本随之增加，亟需对其进行进一步优化。而使用本文设计的考虑线路损耗的数据中心变配电优化系统之后，各个指标均能够满足实际需求，系统运行稳定性较高，符合本文研究目的。

结束语

近年来，数据中心的电气能源消耗日益增加，如何降低线损成为亟待解决的问题。因此，本文将线路损耗考虑在内，设计了数据中心变配电优化系统。从滤波器、UPS电源等硬件；图元库、补偿容量等软件，共同优化了变配电系统的线损，为数据中心的运行提供经济性支持。EA

(收稿日期：2024-12-16)