大型数据中心10 kV自动控制系统技术选型及应用

张 震

(中国民航信息网络股份有限公司，北京 101300)

摘要：随着大数据、5G和物联网等技术的不断发展，数据中心规模越来越大，传统的人工倒闸操作已无法满足在双路失电压时的系统切换要求，对当前几种数据中心10 kV自动控制系统技术进行了分析研究，并对其优缺点及适用环境进行了分析介绍。同时，给出了基于PLC控制技术的数据中心10 kV控制系统的控制逻辑设计。对数据中心10 kV自动控制系统技术选型及控制逻辑设计具有参考意义。

关键词：大型数据中心；10 kV；自动控制系统；PLC

Technical selection and application of 10 kV automatic control system in large data center

ZHANG Zhen

(Travel Sky Holding&Travel Sky Technology Limited, Beijing 101300, China)

Abstract: With the continuous development of big data, 5G, Internet of Things and other technologies, the scale of data centers is getting larger and larger. The traditional manual switching operation can no longer meet the requirements of system switching when the dual-circuit voltage is lost. The data center 10 kV automatic control system technology has been analyzed and researched, and its advantages, disadvantages and applicable environment have been analyzed and introduced. At the same time, this article gives the control design of the data center 10 kV control system based on PLC control technology. This article has reference significance for the technical selection and control design of the 10 kV control system of the data center.

Key words: large data center; 10 kV; automatic control system; PLC

0 引言

根据GB 50174—2017《数据中心设计规范》要求，对于高等级的A级数据中心，要求采用柴油发电机作为备用电源，在双路市电供电中断时，利用柴油发电机为数据中心提供备用电源。近年来，随着数据中心的快速发展，高密度、高等级的数据中心多采用中压柴油发电机作为后备电源。在大型数据中心采用人工倒闸方式实现备用电源的接入，带来了巨大的人工运维成本和UPS蓄电池采购成本。如何在国标A级机房模块要求的UPS蓄电池后备时间15 min内完成备用电源的快速接入，成为各大数据中心在建设时需要考虑的重要问题之一。

针对大型数据中心备用电源接入这一重要问题，现阶段数据中心自动化控制系统主要有三种解决方案：基于PLC控制技术[1]、基于备自投控制技术[2]和基于微机保护装置控制技术[3]。本文将对这三种技术的选型进行对比介绍，并就某中

央企业大型数据中心所采用的PLC控制技术的应用逻辑设计进行阐述。

1 三种自动控制系统解决方案对比分析

大型数据中心多采用GB 50174—2017《数据中心设计规范》A级标准进行设计，实际建设时采用中压柴油发电机系统作为后备电源，中压系统架构采用单母线分段设计，同时配备UPS及蓄电池保证数据中心IT设备的供电质量，并在发生双路市电供电中断时，通过UPS蓄电池放电来实现柴油发电机起动过程中的IT设备不间断供电。10 kV自动控制系统必须在蓄电池后备时间内完成系统切换。

A级数据中心要求UPS蓄电池后备时间为15 min，自动控制系统需要在15 min内实现柴油发电机电源接入。对于采用（7+1）冗余的一套中压柴油发电机系统，从双路失电压到柴油发电机系统完成并机后电源输出的时间为0.5～1 min，则控制系统需要14 min内完成整个投切过程。在控制时间要求方面，基于PLC控制技术、基于备自投控制技术和基于微机保护装置控制技术这三种技术都可以实现在蓄电池放电时间内完成系统电源切换。

同时，对于数据中心10 kV自动化控制系统的选择，还应从以下几个主要方面进行考虑：

1）明确控制系统控制的范围，是否须对柴油发电机系统进行控制。

2）该技术方案从功能上是否满足应用需求，哪些功能是必须满足的核心需要。

3）该技术方案系统冗余性是否满足应用需求。

4）该技术方案是否在数据中心已有成熟案例。

5）若为改造项目，微机保护装置通信协议是否满足该技术方案要求。

6）若为改造项目，现场停电条件是否满足该技术方案的实施条件。

通过对比分析可知，微机保护装置控制技术适合在数据中心建设初期同微机保护装置一同考虑设计，PLC控制技术和备自投控制技术适合已建数据中心改造实施，三种技术方案详细分析见表1。

表 1 三种控制技术方案优缺点对比分析

Tab. 1 Comparative analysis table of advantages and disadvantages of three control technology schemes

技术方案	主要优点	主要缺点
PLC 控制技术	通过硬接线连接，对微机保护装置无要求 通过编程，可实现数据中心复杂的逻辑控制	连接线缆多，实施成本高 须通过变送器实现模拟量采集 非标准产品，系统可用性取决于施工质量和编程人员能力
备自投控制技术	可直接接入模拟信号 可实现故障录波和 SOE 数据记录 国产设备价格便宜	应用案例相对较少 冗余系统无法实现热备份 数据中心应用案例较少
微机保护装置控制技术	通过网络控制系统线缆少，结构简单 可实现全链路冗余 标准化产品，系统经过专业机构测试认证 可对系统进行在线测试	需要综保支持 IEC 61850 协议，不适用于改造型项目

2 基于PLC的自动化控制系统应用

某中央企业大型数据中心已建设投产运行多年，原中压系统采用人工倒闸操作进行双路失电压时的后备电源接入，随着生产负荷的不断增加，原有UPS蓄电池及蓄冷罐后备时间已无法满足人工倒闸时间要求，须进行技术改造。由于现场中压柜微机保护装置不支持IEC 61850协议，故无法选择微机保护装置控制技术方案。同时，考虑数据中心运行IT系统的重要性，故选择技术成熟且应用案例较多的PLC控制技术方案。

2.1 数据中心典型供电架构介绍

该企业数据中心中压供电系统架构图如图1所示。主电源采用双路市电供电，10 kV系统采用单母线分段设计，两路市电为两段母线进行供电，同时两段母线互为备份，两段母线间配置母联断路器，在一段市电供电中断时，可通过母联带两段母线负荷。

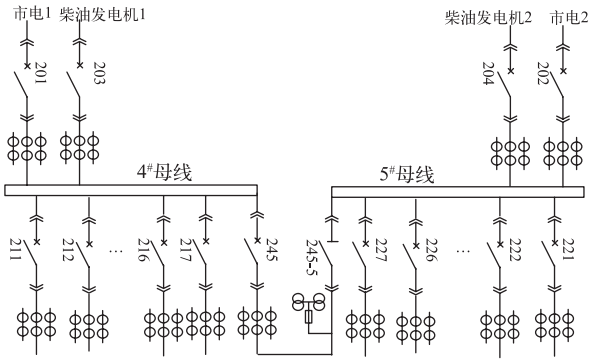

图 1　数据中心中压供电系统架构图

Fig. 1 Architecture diagram of medium voltage power supply system in data center

备用电源采用柴油发电机供电，配置两组（7+1）冗余中压柴油发电机系统，两组柴油发电机系统分别接入中压系统的4#、5#母线。每套柴油发电机系统独立进行控制，在发生双路失电压时，由市电系统将失电压信号提供给柴油发电机控制系统，控制系统在1 min内完成自动并机控制后，将柴油发电机电源送到柴油发电机进线断路器203/204上口。数据中心UPS配置有后备时间为15 min的蓄电池，在10 kV自动控制系统完成单、双路市电供电中断投切过程中，通过放电维持数据中心IT设备不间断供电。

3　10 kV自动控制系统控制设计

3.1　控制系统控制逻辑设计

在数据中心10 kV自动控制系统设计中，应满足以下应用场景：

1）当双路市电供电正常时，自动控制系统不动作，系统由双路市电进行供电。

2）当一路外网市电供电中断时，自动控制系统控制201、202断路器分闸，控制245断路器合闸。

3）当双路外网市电供电中断时，自动控制系统控制进线断路器201、202及各馈线断路器分闸，同时将双路失电压信号传递给柴油发电机系统，柴油发电机系统完成并机后将电源送至203、204断路器上口。自动控制系统检测到203、204断路器上口电源后，依次合进线断路器及各馈线断路器。系统由柴油发电机进行供电。

4）当单路进线断路器故障时，系统应不进行自动投切动作。

5）系统应满足断路器互锁功能，进线断路器和母联断路器应满足3选2要求。

6）在系统投切过程中，当馈线断路器故障时，应不影响系统投切过程。

7）单路失电压后的双路失电压，系统自动进行投切。

8）自投不自复，外网市电电源恢复后，系统不进行自动投切。在与供电局确认后，由人工发起恢复命令，由系统进行自动恢复市电操作，避免外网电源检修过程中由于市电不稳定引起系统的反复投切。

9）当系统失效时，系统能一键切换为手动模式。

3.2　控制系统逻辑设备点位采集设计

控制系统为满足系统逻辑控制需求，须对各进线断路器和馈线断路器数字量及模拟量采集信息，见表2和表3。

表 2　中压柜数字点位采集表

Tab. 2 Collection table of digital point for medium voltage cabinet

设备	状态	类型	备注
各中压柜（除母联隔离柜）	断路器远程	DI	市电进线柜还需采集 PT 断线保护 馈线柜还需采集变压器高温报警及超温跳闸信号
	断路器合位	DI	
	断路器分位	DI	
	弹簧未储能	DI	
	手车工作位置	DI	
	手车试验位置	DI	
	过电流	DI	
	速断	DI	
	带电状态	DI	
	遥控分闸输出	DO	
	遥控合闸输出	DO	
	事故总	DI	

表 3　中压柜模拟点位采集表

Tab. 3 Collection table of analog points for medium voltage cabinets

设备	状态	类型	备注
各中压柜	I_a	AI	母线只采集三相电压 U_a/U_b/U_c，母联柜不采集 U_0/I_0
	I_b	AI	
	I_c	AI	
	U_a	AI	
	U_b	AI	
	U_c	AI	
	U_0	AI	
	I_0	AI	

3.3　控制系统逻辑设计原则

为满足与供电局的级差配合以及在系统投切过程中避免对柴油发电机系统造成过大冲击，自动控制逻辑应按如下原则进行设计：

1）现有高压失电压投切时间及控制逻辑尽量与原系统保持一致，中压系统投切时，避免低压母联控制系统投切动作。

2）单路失电压，中压进线断路器延时4.1 s跳闸，馈线断路器不跳闸，延时0.3 s，高压母联合闸带全站。

3）低压进线断路器不动作（部分系统需对低压进线失电压控制器进行改造），低压母联不动作。

4）双路失电压，中压进线断路器跳闸，馈线断路器跳闸，高压母联不动作。

5）柴油发电机自起动，两路柴油发电机进线断路器都合闸后，延时1 min，各馈出断路器依次延时5 s合闸。

6）双路失电压后，低压进线断路器延时5 s分闸，低压母联不动作。

7）恢复柴油发电机供电后动作，401、402延时0.5 s合闸，母联断路器不动作（要求两路进线合闸时间差小于5.5 s）。

8）进线断路器故障（过电流、速断、拒分和拒合）时，系统锁定，不执行任何操作。

9）馈线断路器故障（过电流、速断、拒分和拒合）时，不影响自动控制系统正常执行，对该断路器不执行操作。

10）两路柴油发电机进线有一路柴油发电机故障时，自动控制系统不执行操作。

3.4　控制系统核心场景设计

在图1所示的系统架构图中，假设只计算进线柜、母联柜的数字量输入（DI）的组合场景，则进线柜4台，每个进线柜 8个DI；母联柜1台，每个母联柜7个DI。计算可得对应的组合场景数为

$$2^{(4\times 8+1\times 7)}=2^{39} \tag{1}$$

考虑投切原则，将以上场景归纳为以下11种核心供电模式场景。

1）市电1、市电2供电模式M1：两路市电供电正常，两段母线由两路市电分别进行供电。

2）市电1供电模式M2：市电2供电中断，5#母线通过母联由市电1进行供电。

3）市电2供电模式M3：市电1供电中断，4#母线通过母联由市电2进行供电。

4）市电1孤岛供电模式M4：市电2供电中断，母联断路器245合闸失败，市电1仅给4#母线进行供电。

5）市电1孤岛供电模式M5：市电1供电中断，母联断路器245合闸失败，市电2仅给5#母线进行供电。

6）柴油发电机1、柴油发电机2供电模式M6：市电1、市电2供电中断，由柴油发电机1、柴油发电机2分别给两段母线进行供电。

7）柴电1供电模式M7：市电1、市电2供电中断，柴油发电机1运行正常，柴油发电机2故障，由柴油发电机1通过母联带4#、5#母线。

8）柴油发电机1供电模式M8：市电1、市电2供电中断，柴油发电机2运行正常，柴油发电机1故障，由柴油发电机2通过母联带4#、5#母线。

9）柴油发电机1孤岛供电模式M9：市电1、市电2供电中断，柴油发电机1运行正常，柴油发电机2故障，母联断路器245投切失败，由柴油发电机1带4#母线。

10）柴油发电机2孤岛供电模式M10：市电1、市电2供电中断，柴油发电机2运行正常，柴油发电机1故障，母联断路器245投切失败，由柴油发电机2带5#母线。

11）等待柴油发电机并机送电模式M11：市电1、市电2供电中断，柴油发电机1故障，柴油发电机2故障，系统等待柴油发电机正常运行后进行自动投切。

在系统投切过程中，以上核心场景遵循以下原则：

1）系统在自投自复过程中总是向优先级更高的模式投切，投切路线为M11> M10> M9> M8> M7 > M6> M5> M4> M3> M2> M1。

2）系统在自投手复模式单相投切时，相同优先级不互相投切，投切路线为 M1> M2> M3> M4 > M5> M6> M7> M8> M9> M10>请求手复。

3.5 自动控制系统PLC程序逻辑设计

自动控制系统在程序设计时，核心控制逻辑包含系统安全联锁、进线断路器分合闸、馈线断路器分合闸、母联断路器分合闸和自动控制跳出转手动控制等。

系统安全联锁为201/202/245三个断路器任何时候只能有两个断路器合闸，203/204/245三个断路器任何时候只能有两个断路器合闸，市电和柴油发电机不能同时进行供电。系统安全联锁程序逻辑图如图2～图6所示。

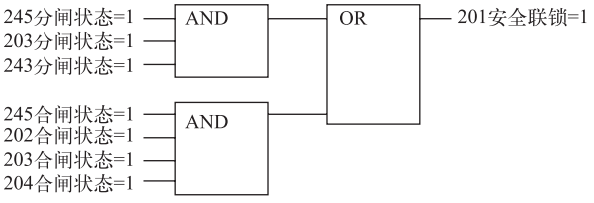

图 2　201 断路器安全联锁程序逻辑图

Fig. 2 Logic diagram of 201 circuit breaker safety interlock program

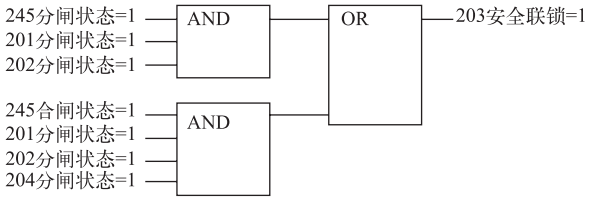

图 3　203 断路器安全联锁程序逻辑图

Fig. 3 Logic diagram of 203 circuit breaker safety interlock program

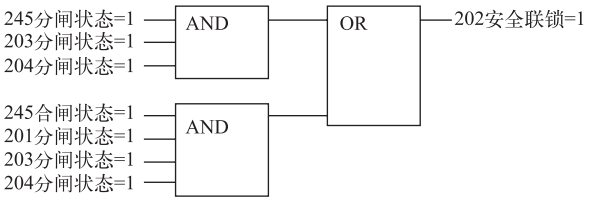

图 4　202 断路器安全联锁程序逻辑图

Fig. 4 Logic diagram of 202 circuit breaker safety interlock program

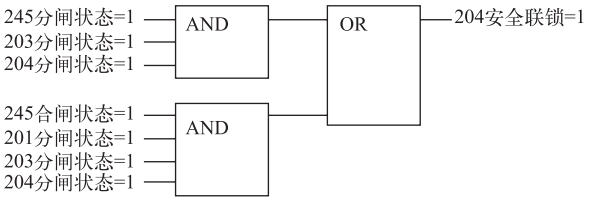

图 5　201 断路器安全联锁程序逻辑图

Fig. 5 Logic diagram of 201 circuit breaker safety interlock program

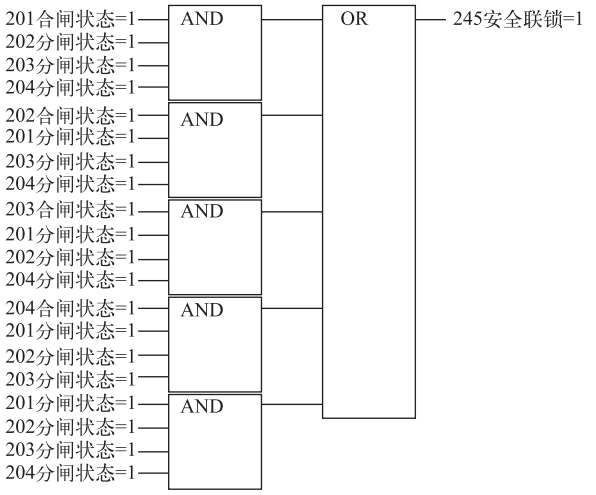

图 6　245 断路器安全联锁程序逻辑图

Fig. 6 Logic diagram of 245 circuit breaker safety interlock program

馈线断路器合闸必须同时满足处于远程控制状态、处于分闸状态、储能已完成、地开关未合闸、无故障、未合闸失败、处于可控状态、处于试验位或工作位及合闸延时要求。馈线断路器（以211断路器为例）合闸控制程序逻辑图如图7所示。

馈线断路器分闸必须同时满足处于远程控制状态、处于合闸状态、地开关未合闸、无故障、未合闸失败、处于可控状态及处于试验位或工作位要求。馈线断路器（以211断路器为例）分闸

控制程序逻辑图如图8所示。

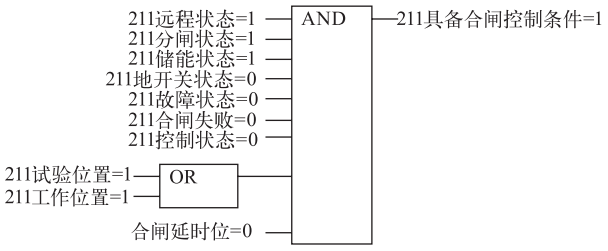

图 7　211 断路器合闸控制程序逻辑图

Fig. 7 Logic diagram of 211 circuit breaker closing control program

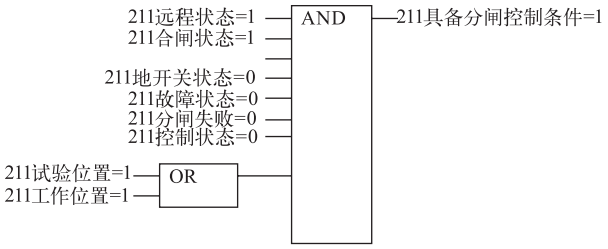

图 8　211 断路器分闸控制程序逻辑图

Fig. 8 Logic diagram of 211 circuit breaker opening control program

进线断路器合闸必须同时满足处于远程控制状态、处于分闸状态、储能已完成、符合安全联锁条件、无故障、未合闸失败、处于可控状态、处于试验位或工作位及合闸延时要求。进线断路器（以201断路器为例）合闸控制程序逻辑图如图9所示。

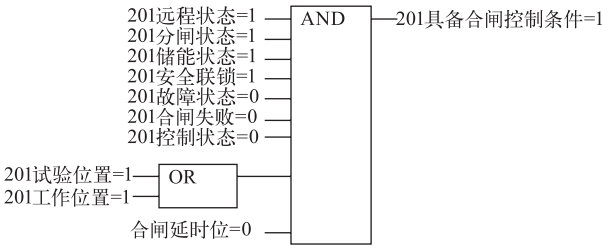

图 9　201 断路器合闸控制程序逻辑图

Fig. 9 Logic diagram of 201 circuit breaker closing control program

进线断路器分闸必须同时满足处于远程控制状态、处于合闸状态、无故障、未合闸失败、处于可控状态及处于试验位或工作位要求。进线断路器（以201断路器为例）分闸控制程序逻辑图如图10所示。

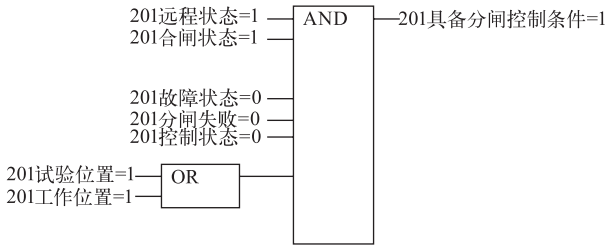

图 10　201 断路器分闸控制程序逻辑图

Fig. 10 Logic diagram of 201 circuit breaker opening control program

母联245断路器合闸必须同时满足处于远程控制状态、处于分闸状态、储能已完成、符合安全联锁条件、无故障、未合闸失败、处于可控状态、处于试验位或工作位及合闸延时要求。母联245断路器合闸控制程序逻辑图如图11所示。

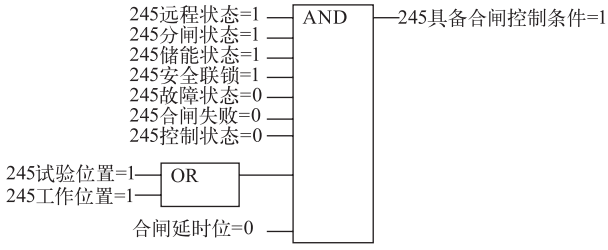

图 11　245 断路器合闸控制程序逻辑图

Fig. 11 Logic diagram of 245 circuit breaker closing control program

母联245断路器分闸必须同时满足母联断路器处于远程控制状态、处于合闸状态、无故障、未合闸失败、处于可控状态及处于试验位或工作位要求。母联245断路器分闸控制程序逻辑图如图12所示。

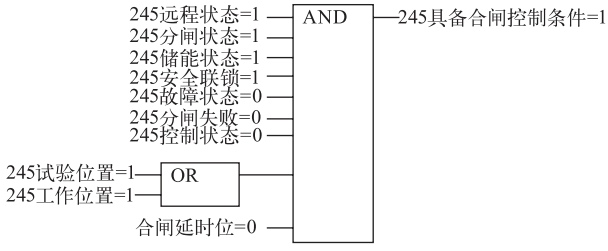

图 12　245 断路器分闸控制程序逻辑图

Fig. 12 Logic diagram of 245 circuit breaker opening control program

自动控制系统在出现四个进线断路器及母联断路器中任意一个断路器无效状态、状态错误、

无效位置、故障状态、合闸失败、分闸失败或出现以上断路器之间联锁报警时，系统将退出自动控制，转为手动控制。自动控制系统转手动控制控制程序逻辑图如图13所示。

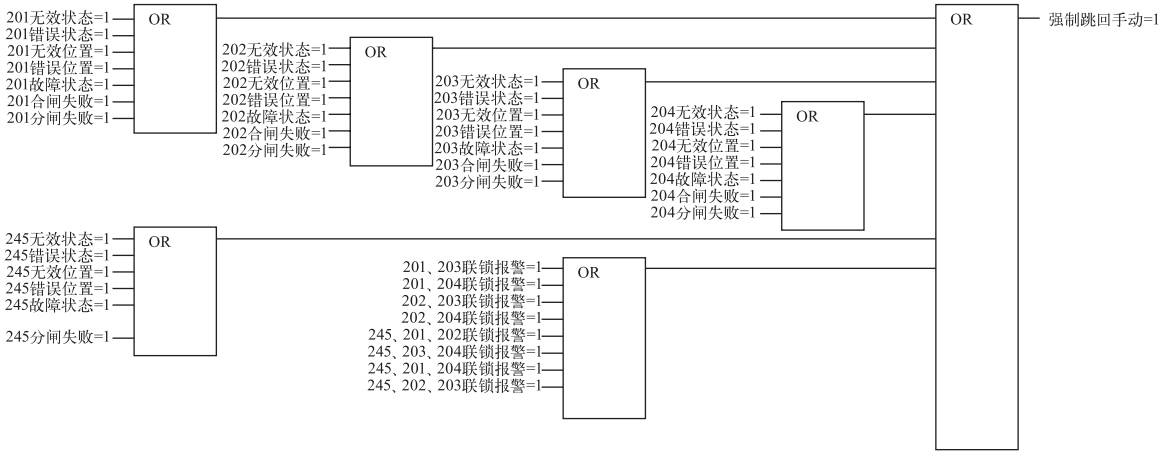

图 13　自动控制系统转手动控制程序逻辑图

Fig. 13 Logic diagram of automatic control system to manual control program

4　结束语

本文对数据中心10 kV自动控制系统三种主要技术进行了优缺点介绍分析，同时，给出了现阶段数据中心采用最多、技术最成熟的基于PLC的10 kV自动控制系统的核心控制逻辑设计。该设计实现的10 kV控制系统投入后在外网市电单、双路失电压时的切换安全性、可靠性得到大幅提升；控制系统可以在单路失电压时1 min内完成投切，双路失电压时3 min内完成后备柴油发电机接入，可以减少UPS蓄电池的使用，对节能和环保具有较大意义。本设计已在多个数据中心得到可靠验证，可供广大设计人员及数据中心用户在数据中心10 kV自动化控制系统建设中参考。

参考文献

[1]　刘赞，孟祥宇，贾恩明，等．数据中心10 kV供电自动投切控制系统[J]．制造业自动化，2017(6)：31-35．

[2]　李连昌，刘勇．大型数据中心供电电源自控技术研究与应用[J]．供用电，2016，33(3)：59-62．

[3]　施耐德电气（中国）有限公司．数据中心A5自动投切系统说明书[Z]。

[4]　西门子（中国）公司．西门子S7-400用户手册[Z]．

[5]　马小军．建筑电气控制技术[M]．北京：机械工业出版社，2008．

[6]　数据中心设计规范：GB 50174—2017[S]．

作者简介

张震（1988—），男，工程师，主要从事数据中心电气系统建设及运维管理工作。

（收稿日期：2022-01-25）