

# 某换流站调相机外冷水系统的设计

张辉亮 王小飞 赵盛国 谢小冬 吕浩萌

(常州博瑞电力自动化设备有限公司, 江苏 常州 213025)

**摘要** 本文分别从换热效果、占地面积、耗水量、成本等方面对比闭式水冷却系统和开式水冷却系统的优缺点, 结合某换流站加装调相机的换热容量、站址环境条件、调相机换热器入口温度等需求, 并综合考虑经济投入和运维方面的因素, 最终确定该换流站调相机外冷水系统采用开式循环水冷却的方案, 并给出调相机外冷水系统的具体设计方案, 以期为后续工程调相机外冷水系统的选择和设计提供参考。

**关键词:** 调相机; 外冷系统; 闭式水冷却系统; 开式水冷却系统

## Design of the external water cooling system for the phase modulator in a converter station

ZHANG Huiliang WANG Xiaofei ZHAO Shengguo XIE Xiaodong LÜ Haomeng

(NR Electric Power Electronics Co., Ltd, Changzhou, Jiangsu 213025)

**Abstract** This paper compares the advantages and disadvantages of closed water cooling systems and open water cooling systems in terms of heat transfer efficiency, footprint, water consumption, and cost. The heat transfer capacity, site environmental conditions, inlet temperature of the phase modulator heat exchanger, and other requirements are taken into account for installing a phase modulator at a certain converter station, as well as the economic investment and operational factors. It is ultimately determined that the external water cooling system for the phase modulator at the converter station adopts an open water cooling scheme. The design scheme of external cooling system for the phase modulator is given in this paper, hoping to provide reference for the selection and design of the external cooling system for phase modulator in subsequent projects.

**Keywords:** phase modulator; external cooling system; closed water cooling system; open water cooling system

## 0 引言

新一代调相机一般指额定容量为 300Mvar 且采用隐极机的调相机<sup>[1-2]</sup>, 在特高压直流电网中具有不可替代的作用, 能减少直流换相失败状况的发生<sup>[3-4]</sup>。相比于传统调相机, 新一代调相机具有动态特性好、安全可靠、运行维护方便等优点<sup>[5]</sup>, 可为电网提供充足的无功支撑, 保障其安全稳定运行<sup>[6]</sup>。

调相机在正常运行中会产生大量热量, 若这些热量不能及时散发出去, 轻则导致设备故障, 重则导致调相机系统烧毁, 造成不可挽回的后果。因此, 设计兼顾经济性和可靠性的外冷水系统, 成为保证调相机安全稳定运行的关键。

本文通过分析调相机外冷水系统的不同方案, 结合某换流站站址环境条件、水源条件、调相机运行水温需求、经济性等因素, 确定调相机外冷水系统的最终设计方案, 以保证调相机的长期安全可靠运行。

## 1 冷却系统概述

新一代调相机的冷却系统一般分为内冷系统和外冷系统<sup>[7-8]</sup>。内冷系统位于调相机主机设备内, 以风冷调相机主机为例, 内冷系统一般由换热器、转子风扇、风道等组成。外冷系统一般采用水作为冷却介质, 冷却水流经调相机换热器, 通过水泵循环将热量带到室外换热设备, 再由换热设备实现散热。

外冷水系统分为闭式水冷却系统和开式水冷却系统两种。

### 1.1 闭式水冷却系统

闭式水冷却系统一般由循环水泵、补水系统、外冷设备（空气冷却器、冷却塔或两个设备联合）、稳压系统、主过滤器、管道、仪器仪表、阀门等连接成一个密闭的循环回路<sup>[9-10]</sup>。其中，稳压系统为整个闭式水冷却系统提供恒定的压力，保证整个冷却系统的静压并隔绝外界空气，一般设计为一个稳压罐体，罐体上部采用氮气提供恒定压力<sup>[11]</sup>。

对于闭式水冷却系统，根据被冷却对象进水温度需求和项目地水源情况，确定选用空气冷却器、闭式冷却塔或是两种设备联合冷却的方式。通常当被冷却对象进水温度比项目地环境极端温度高 5℃ 以上时，宜采用空气冷却器。采用空气冷却器的闭式水冷却系统示意图如图 1 所示。

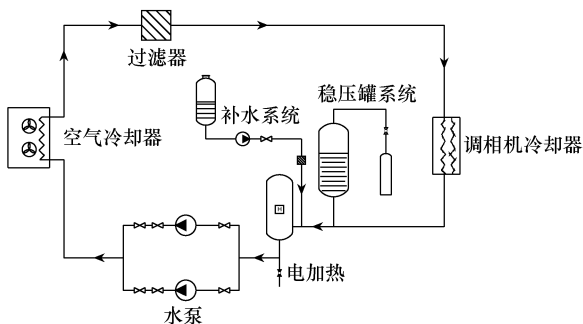


图 1 采用空气冷却器的闭式水冷却系统示意图

当选用空气冷却器不能满足被冷却对象散热需求且项目地水源充足时，选用闭式冷却塔。当选用空气冷却器不能满足被冷却对象散热需求且项目地水资源紧缺时，选用干湿联合的冷却设备，即选用空气冷却器串联闭式冷却塔的的方案。闭式干湿联合的水冷却系统示意图如图 2 所示。

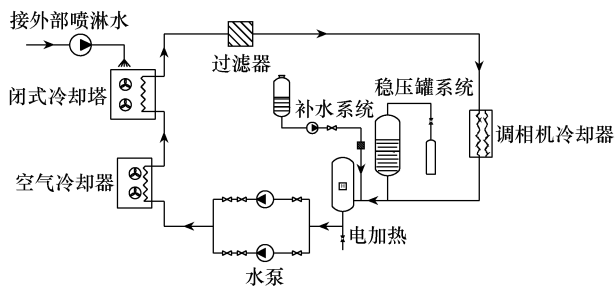


图 2 闭式干湿联合水冷却系统示意图

### 1.2 开式水冷却系统

开式水冷却系统一般由循环水泵、过滤器、开

式冷却塔、水池、管道、仪器仪表、阀门等连接为一个循环回路，其中循环冷却水通过布水器直接喷洒在开式冷却塔的填料上，冷却水与空气接触达到降低水温的目的。开式水冷却系统示意图如图 3 所示。

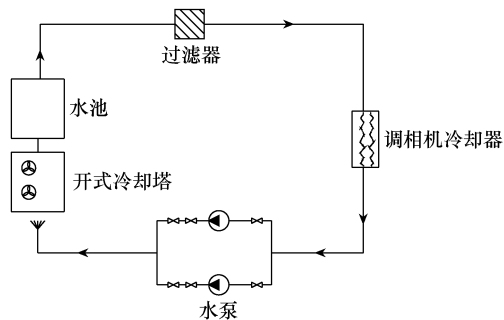


图 3 开式水冷却系统示意图

## 2 某换流站调相机外冷水系统方案设计

### 2.1 项目概况

某项目区域气候属于温带季风大陆性气候，四季分明，雨量充沛，水资源丰富，极端最高气温为 41.2℃，湿球温度为 26.7℃。换流站内新建 2 台 300Mvar 调相机，根据换流站总平面布置规划，项目调相机区域位于换流站的西南角。2 台调相机的冷却容量为 8 400kW，总流量为 1 200m<sup>3</sup>/h，调相机外冷水系统设计参数见表 1。

表 1 调相机外冷水系统设计参数

序号	参数	数值	备注
1	调相机冷却容量/kW	4 200	单台参数
2	调相机水流量/(m <sup>3</sup> /h)	600	单台参数
3	湿球温度/℃	26.7	
4	极端最高气温/℃	41.2	
5	极端最低气温/℃	-16.9	

### 2.2 外冷水系统方案设计

调相机外冷水系统设计方案一般从多个方面对比确定，如冷却对象进出口温度（调相机外冷水进水温度 38℃，出水温度 45℃）、极端环境温度、水源条件、设备造价、占地等。冷却塔一般应用于常年水资源丰富的地区<sup>[12]</sup>，经过对比开式冷却塔方案、闭式冷却塔方案和干湿联合冷却方案，最终确定采用开式外冷水系统的冷却方案。调相机外冷水系统方案对比见表 2。

表2 调相机外冷水系统方案对比

项目	开式外冷水系统	闭式外冷水系统	
		闭式冷却塔	干湿联合
换热设备形式	开式冷却塔	闭式冷却塔	干湿联合
换热效果	换热效率高,能效比高	换热效果好	换热效果好
占地面积	占地面积小	占地面积小	占地面积大
耗水量/(万 t/年)	约 10.7	约 11	约 2.88
水费/万元	52.2	54	14
基建价格(两台机)/万元	1 000	1 800	2 400
运检费用(含检修、药剂)/(万/年)	70	50	50
优点	成本低	换热效率高、不容易结垢	节约水
缺点	藻类滋生、腐蚀结垢	成本高	占地面积大,成本高

### 3 某换流站调相机外冷水系统

#### 3.1 工艺原理

该调相机外冷水系统采用带机力通风冷却塔的循环供水系统,循环水系统采用扩大单元制供水系统,其流程为冷却塔集水池→循环水回水管(沟)→循环水泵房→循环水供水压力管→调相机冷却换热器→循环水排水压力管→开式冷却塔→冷却塔集水池,依此形成循环回路,为调相机提供冷却水。调相机外冷水系统工艺流程如图4所示。两台调相机共配置循环水泵3台(2用1备),机力通风冷却塔3台(2用1备)。

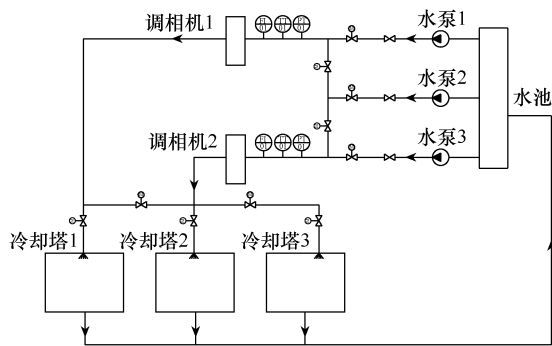


图4 调相机外冷水系统工艺流程

采用扩大单元制系统可满足调相机和冷却系统的轮停检修需要,提高整个系统的冷却效率,通过控制系统中阀门的开关,实现外冷水系统设备运行状态的切换,从而实现调相机轮停。

#### 3.2 循环水泵

调相机外冷水系统管路主要由水泵房至调相机换热器入口管路、调相机换热器、调相机换热器出口至冷却塔管路、冷却塔至水泵入口管路或管沟等连接形成开式循环回路。循环水泵是整个冷却系统

的关键设备,为系统提供动力源。循环水泵扬程的设计至关重要,需要计算系统管路的沿程阻力损失、局部阻力损失及各设备的阻力损失后,才能确定循环水泵扬程。

沿程阻力损失是在每段缓流区域内单位质量流体沿流程的能量损失。研究表明,沿程阻力损失  $h_f$  与单位质量流体所具有的动能和流程长度成正比,与通道的直径成反比,通常表示为

$$h_f = \lambda \frac{lv^2}{2dg} \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为沿程损失系数;  $l$  为管长;  $v$  为管内流体流速;  $d$  为管道内径;  $g$  为重力加速度。

局部阻力损失是当管道中因截面面积或流动方向改变而引起流动急剧变化时,单位质量流体的能量损失,通常表示为

$$h_j = \varepsilon \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

式中:  $h_j$  为局部阻力损失;  $\varepsilon$  为局部阻力系数。

根据式(1)和式(2)计算系统管路的沿程阻力损失和局部阻力损失,再根据调相机换热器的水阻计算循环水路的水阻  $H$ ,计算过程如下:

- 1) 水泵房至调相机换热器入口管路水阻  $H_1=78.6\text{kPa}$ 。
- 2) 调相机换热器水阻  $H_2=79.7\text{kPa}$ 。
- 3) 调相机换热器出口至冷却塔管路水阻  $H_3=80\text{kPa}$ 。
- 4) 冷却塔至水泵入口管路水阻为  $H_4=50\text{kPa}$ 。
- 5) 总水阻  $H=H_1+H_2+H_3+H_4=288.3\text{kPa}$ 。

主循环水泵扬程  $Y=288.3 \times 0.102\text{m}=29.4\text{m}$ 。同

时,考虑到水头安全裕度,确定水泵扬程为31m。

### 3.3 开式冷却塔

2台调相机共需要的冷却容量为8400kW,所需的总流量为1200m<sup>3</sup>/h;选用3台冷却塔2用1备的方案,其中2台冷却塔的换热容量可满足2台调相机满出力运行的换热容量要求。当1台冷却塔发生故障或停机检修时,不需要关闭故障冷却塔进出水阀门,其余2台冷却塔运行即可保证调相机的进水温度限值。按湿球温度26.7℃设计,采用计算软件核算,冷却塔运行工况如下:

1)当3台冷却塔正常运行时,单台塔流经的流量为413.3m<sup>3</sup>/h,经选型计算得冷却塔进水温度为45℃时,出水温度为32.45℃,小于38℃(调相机进水温度限值),满足调相机运行要求。

2)当3台冷却塔运行,其中1台冷却塔出现故

障或停机检修时,不关闭冷却塔进、出口阀门,单台冷却塔流经的流量为413.3m<sup>3</sup>/h,2台冷却塔正常运行进水温度为45℃时,出水温度为35.1℃。1台冷却塔虽然失去风机散热能力,但是冷却水依然从填料中流过,冷却塔仍具有一定的散热能力,此时出水温度近似为40.3℃,与其他2台冷却塔的出水进行混合后的出水温度为36.83℃,小于38℃(调相机进水温度限值),满足调相机运行水温要求。

3)当3台冷却塔运行,其中1台冷却塔出现故障或停机检修时,关闭冷却塔入口阀门,单台冷却塔流经的流量为600m<sup>3</sup>/h,经选型计算得出进水温度为45℃,出水温度为34.46℃,小于38℃(调相机进水温度限值),满足调相机运行要求。

通过以上工况核算,冷却塔的选型满足调相机换热需求。冷却塔核算结果见表3。

表3 冷却塔核算结果

项目	工况1	工况2	工况3
工况说明	3台运行	2台运行,1台故障(不关闭阀门)	2台运行,1台故障(关闭阀门)
冷却容量/kW	8400		
单台塔处理水量/(m <sup>3</sup> /h)	413.3	413.3	600.0
冷却塔出水温度/℃	32.45	36.83	34.46
冷却塔进水温度/℃	45		

### 3.4 调相机外冷水系统的控制

调相机外冷水系统的控制和保护功能均由分布式控制系统(distributed control system, DCS)实现,冷却系统的信号全部接入DCS,即所有运行控制指令和运行逻辑判断由DCS完成。其中,外冷水系统最主要的设备为主循环水泵和冷却塔,其控制最复杂且运行方式直接影响调相机的安全运行,因此本文主要研究循环水泵和冷却塔的运行控制。

#### 1) 循环水泵的运行控制

由于水泵流量大、功率大,为减小水泵启动时的电流冲击,在电气回路中设计软起动机。当水泵启动时,先经过软启动回路启动,以减小电流的冲击,运行一定时间后切换至工频电气回路长期运行。为保证水泵在正常运行和故障工况下均能可靠切换,首先对3台水泵进行编码,确保水泵实物编号与程序编号对应,实现精准识别。水泵运行模式编码定义见表4。

水泵故障等级分为三级:当水泵工频回路与软启动回路均正常时,水泵无故障,故障等级为0;当水泵工频回路与软启动回路有且只有一个故障

表4 水泵运行模式编码定义

泵1运行	泵2运行	泵3运行	运行模式编码
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	2
0	1	1	3
1	0	0	4
1	0	1	5
1	1	0	6
1	1	1	7

时,水泵轻微故障,故障等级为1;当水泵工频回路与软启动回路全部故障时,水泵严重故障,故障等级为2。循环水泵故障等级分类如图5所示。

循环水泵运行控制逻辑如图6所示,具体如下:

(1)主循环水泵均无故障时,可正常进行周期或远程切泵,即运行168h(可设定)切泵,先启动备用泵(优先软起动机运行,再切至工频运行),再停运泵。

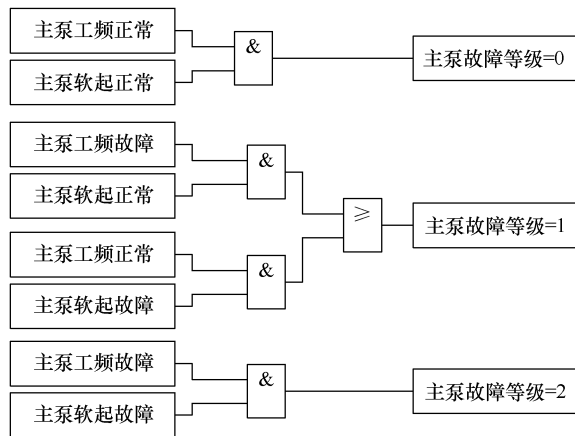


图 5 循环水泵故障等级分类

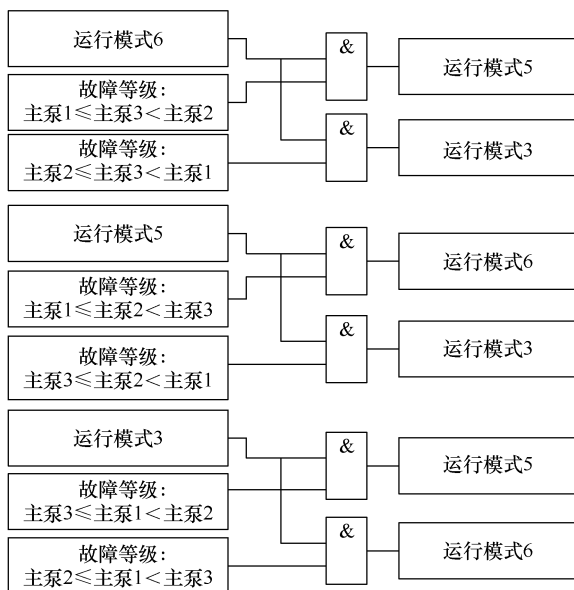


图 6 循环水泵控制逻辑

(2) 主循环泵的软起动器、工频回路均故障，退出备用状态。

(3) 运行泵在工频回路运行，此时工频回路故障而软起动回路无故障时，若备用泵故障等级高于运行泵，则切换至运行泵软起动回路运行。

(4) 运行泵在软起动回路运行，此时软起动回路故障而工频回路无故障，若备用泵故障等级高于运行泵，则切至运行泵工频回路运行。

(5) 运行泵故障等级大于备用泵，若备用泵软起动回路故障，则直接切至备用泵工频回路运行。

(6) 运行泵故障等级大于备用泵，若备用泵工频回路故障，则直接切至备用泵软起动回路运行，并保持软起动回路运行。

(7) 备用泵软起回路故障而工频回路无故障，当运行泵软起动回路故障而工频回路无故障时（此

时运行泵与备用泵故障等级相同），则切至运行泵工频回路运行。

2) 冷却塔的运行控制

冷却塔运行控制逻辑如下：

(1) 冷却塔风机共 3 台，根据水温分组起停，轮起轮停，先起先停。若 1 台风机故障（包含跳闸）或处于检修状态（人工退出轮起轮停），则自动将此风机退出轮起轮停控制；当故障消失或检修结束后，由运行人员在后台手动确认，再将此风机投入轮起轮停控制。

(2) 风机控制的目标温度取 2 台机组的循环冷却水供水温度（每台机组 3 个温度取平均值）中的较大值。

(3) 冷却系统启动后，冷却塔风机根据调相机供水温度进行比例积分（PI）闭环调节。

(4) 为保证调相机进水温度可控，DCS 实时采集调相机换热器入口水温  $T$  和冷却塔风机的转速，并根据环境温度变化和调相机负荷大小的变化，通过变频调节冷却塔风机的转速达到控制调相机进水温度的目的，从而保证调相机进口温度满足限值。

当  $T \geq 30^\circ\text{C}$  时，延时 2s 起动变频风机，1 台风机投入。以最低频率 20Hz 运行 80s，80s 后进行 PI 控制调节。当  $T > 30.5^\circ\text{C}$  时，PI 频率上升；当  $T < 29.5^\circ\text{C}$  时，PI 频率下降；当  $T < 28^\circ\text{C}$  时，最低频率 20Hz 运行 15min 后，停运变频风机。

当  $T \geq 32^\circ\text{C}$  时，延时 75s 起动变频风机，2 台风机投入。变频投入时全部风机变频送固定 25Hz 运行 30s，30s 后进行 PI 控制调节。当  $T > 32.5^\circ\text{C}$  时，PI 频率上升；当  $T < 31.5^\circ\text{C}$  时，PI 频率下降；当  $T < 30^\circ\text{C}$  时，最低频率 20Hz 运行 15min 后，停运 1 台变频风机。

当  $T \geq 34^\circ\text{C}$  时，延时 75s 起动变频风机，3 台风机投入。变频投入时全部风机变频送固定 25Hz 运行 30s，30s 后进行 PI 控制调节。当  $T > 34.5^\circ\text{C}$  时，PI 频率上升；当  $T < 33.5^\circ\text{C}$  时，PI 频率下降；当  $T < 32^\circ\text{C}$  时，最低频率 20Hz 运行 15min 后，停运 1 台变频风机。

(5) 风机工频变频自动切换联锁投入，变频跳闸或故障自动切换至工频运行（变频停止延时 3s 后再启工频）。变频恢复正常后，需要运行人员在后台操作，切至变频运行（工频停止延时 2s 再切至变频）。

(6) 起停温度均由运行人员在后台设置，起 3 台风机温度  $>$  起 2 台风机温度  $>$  起 1 台风机温度；停 1 台风机温度  $>$  停 2 台风机温度  $>$  停 3 台风机温

度;起3台风机温度>停1台风机温度;起2台风机温度>停2台风机温度;起1台风机温度>停3台风机温度。起停温度定值须同时满足上述原则,否则报定值错误并退出水温自动控制联锁。

#### 4 结论

本文根据某换流站调相机外冷水换热量、流量、进水温度需求及站址环境条件,研究分析了闭式水冷却系统和开式水冷却系统的优缺点,并结合项目的经济投入情况,最终确定两台调相机共用一套开式循环外冷水系统。通过计算循环水路的阻力,确定外冷水系统的工艺流程、循环水泵和冷却塔的选型及运行控制逻辑,以期调相机外冷水系统的设计提供参考。

#### 参考文献

- [1] 郑玉平,潘书燕,柴济民,等.新一代调相机变压器组启机过流保护误动作原因及对策[J].电力系统自动化,2022,46(5):105-112.
  - [2] 阮羚,王庆,凌在汛,等.新型大容量调相机性能特点及工程应用[J].中国电力,2017,50(12):57-61.
  - [3] 张腾,张琳.新一代大容量调相机在电网中的应用[J].集成电路应用,2023,40(5):100-101.
  - [4] 杨鹏程,王庆,钟后鸿,等.新一代调相机参数自适应优化设计[J].电机技术,2020(3):1-3,21.
  - [5] 李志强,蒋维勇,王彦滨,等.大容量新型调相机关键技术参数及其优化设计[J].大电机技术,2017(4):15-22.
  - [6] 苏东亮,邓化运.新型大容量调相机原理及运行控制[J].电气技术,2021,22(6):87-91.
  - [7] 徐大坤,甘露.高温缺水地区调相机外冷却系统研究[J].制冷与空调(四川),2019,33(6):609-612.
  - [8] 郝亚楠,李贵海,颜庆,等.调相机外冷水系统结垢分析及改进研究[J].山东电力技术,2024,51(2):79-84.
  - [9] 张辉亮,刘金革.冷水机组在电力电子水冷却系统中的应用研究[J].电气技术,2021,22(1):71-74.
  - [10] 刘重强,张恩龙,陈绪胜,等.高温缺水地区换流阀冷却系统的研究[J].电力工程技术,2017,36(4):54-58.
  - [11] 黄伟,冯维,王海峰,等.直流换流阀单元模块蒸发冷却系统的仿真分析与试验[J].电工技术学报,2017,32(2):264-270.
  - [12] 白羽丰,周亚素,查小欢.闭式冷却塔冬季运行性能研究[J].建筑热能通风空调,2018,37(3):26-29.
- 
- 收稿日期:2024-08-29  
修回日期:2024-10-06
- 作者简介  
张辉亮(1985—),男,陕西咸阳人,硕士,高级工程师,从事电力电子设备冷却系统研究工作。
- 
- (上接第44页)
- 2024,25(6):39-46,55.
- [2] 和敬涵,罗国敏,程梦晓,等.新一代人工智能在电力系统故障分析及定位中的研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5506-5515.
  - [3] 郭自刚,徐天乐,陈玉林,等.配电网电缆故障在线监测及定位系统[J].电气技术,2022,23(11):74-79.
  - [4] 任志刚,赵雪骞,郭卫,等.基于时域反射技术的电缆渗水缺陷检测方法[J].绝缘材料,2022,55(1):80-86.
  - [5] 周志通,陈永琦,黄璜,等.一种基于频率选择的输电线路故障行波测距方法[J].电气技术,2024,25(2):31-36,44.
  - [6] 饶显杰,徐忠林,刘翔宇,等.基于反射系数与核函数构建的新型电缆缺陷诊断方法[J].电工技术学报,2024,39(7):2184-2192,2213.
  - [7] 梁钟颖,周凯,孟鹏飞,等.基于频域反射系数谱的电缆故障定位与故障类型识别方法研究[J].电工电能新技术,2022,41(8):79-88.
  - [8] OHKI Y, YAMADA T, HIRAI N. Precise location of the excessive temperature points in polymer insulated cables[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2099-2106.
  - [9] 谢敏,周凯,赵世林,等.新型基于反射系数谱的电力电缆局部缺陷定位方法[J].电网技术,2017,41(9):3083-3089.
  - [10] 李蓉,周凯,万航,等.基于频域反射法的10kV配电网中间接头受潮定位[J].电网技术,2021,45(2):825-832.
  - [11] 周志强.基于宽频阻抗谱的电缆局部缺陷诊断方法研究[D].武汉:华中科技大学,2015.
  - [12] 刘鹏程,田立斌,高磊,等.基于反射系数谱相关系数的电缆故障检测方法[J].绝缘材料,2023,56(5):95-102.
- 
- 收稿日期:2024-08-08  
修回日期:2024-08-24
- 作者简介  
吴美胜(1998—),男,江西省九江市人,硕士研究生,研究方向为电力设备状态监测与故障诊断。