

Design and Simulation of Main Transformer Air Cooling Control Cabinet Based on PLC *

MA Runsheng¹, WANG Hefei^{2*}, ZHAO Wenqiang¹, SONG Xiaotong¹, HUANG Kun²

(1. State Grid Qinghai Electric Power Company Electric Power Research Institute, Xining 810000;
2. NARI Nanjing Control System Co., Ltd, Nanjing 210006, China)

Abstract: In order to solve the problems of complicated wiring, poor flexibility, high energy consumption and high noise level in the traditional air-cooled control cabinet of main transformer, the air-cooled control cabinet of main transformer is designed by using programmable controller and frequency converter. According to the oil temperature of the main transformer, the operation frequency of the fan is controlled between 20 and 50 Hz, so that the intelligent and energy-saving operation of the fan can be realized. In order to ensure the safe operation of main transformer fan, switching mode and safety mode are designed. The control cabinet has been put into operation for one year in a 330 kV substation in Qinghai Province. Through field data comparison, the annual energy saving of 47 707 kWh has been realized. The actual operation results show that the control cabinet has the characteristics of simple wiring, convenient control and energy saving.

Key words: electrical engineering; main transformer energy saving; programmable controller; frequency converter; safe
EEACC: 8500 doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2019.05.009

基于 PLC 与变频技术的主变风冷控制柜设计 *

马润生¹, 王贺飞^{2*}, 赵文强¹, 宋晓童¹, 黄 堃²

(1. 国网青海省电力公司电力科学研究院, 西宁 810000; 2. 国电南瑞南京控制系统有限公司, 南京 210006)

摘 要: 为解决传统主变风冷控制柜投切控制方案接线复杂、控制灵活性差、耗能高、噪音大等问题, 采用可编程控制器与变频器设计了主变风冷控制柜, 根据主变油温控制风机运行频率在 20 Hz~50 Hz 之间, 实现风机的智能化而且节能运行。为保证主变风机的安全运行, 设计了投切模式和安全模式。本控制柜在青海某 330 kV 变电站投运一年以来, 通过现场实测数据对比, 实现了 47 707 kWh 的年节能量。实际运行结果验证, 本控制柜具备接线简单、控制方便以及节能的特点。

关键词: 电气工程; 主变节能; 可编程控制器; 变频器; 安全

中图分类号: TM423

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2019)05-1122-06

国内早期投运的 330 kV 及以上电压等级的变压器, 其冷却系统普遍采用强迫油循环风冷式冷却方式, 其运行模式是根据当地环境气候, 由人工经验判断, 投入一定数量的冷却器组, 冷却器设备 24 h 不间断工频运行, 并没有考虑到在环境温度变化下的冷却容量调节因素^[1]。传统的冷却器控制器, 其内部都是交流接触器和热继电器构造而成, 控制模式分为“工作”、“辅助”和“备用”3 种状态^[2-3]。但该控制方式存在以下缺点: (1) 冷却器的冷却容量不能平滑连续变化, 在负荷较小、环境温度低时, 造

成了冷却容量的浪费。(2) 当一天中温度起伏较大时, 冷却器投切频繁, 故障率上升^[4-5]。

1 主变风冷控制柜设计

综合考虑现有的冷却柜的优缺点以及节能与智能化的需求, 本文基于 PLC 可编程控制器以及变频器设计了一种能够根据变压器油温以及主变负载率平滑控制冷却器冷却容量的新型主变风冷控制柜。为保证主变冷却器安全稳定运行, 在变频运行的基础上, 设计了主变风冷控制柜两种补充运行模式: 投切

项目来源: 国网青海省电力公司科研项目“青海 330 kV 变电站主变冷却器节能技术研究与应用”

收稿日期: 2018-11-27 修改日期: 2018-12-08

运行模式和安全运行模式。在 PLC 控制器与变频器均正常运行时,风机处于变频运行模式下;当 PLC 出现故障时,主变智能变频冷却系统将自动投入安全运行模式;当 PLC 运行正常,变频器出现故障时,主变智能变频冷却系统将自动投入投切运行模式。同时,为方便主变冷却器在运检时进行调试,该主变风冷控制柜还具有手动控制冷却器运行的功能。

1.1 主变风冷控制柜冷却器电源设计

主变风冷控制柜的冷却器电源设计分为两个部分:冷却油泵工频电源接线和风机工频变频双电源接线,一组冷却器接线如图 1 所示。油泵电源系统中,由于油泵对于供电可靠性的要求较高,因此油泵的供电由进线接触器 KM11 直接从进线取电,不在变频下运行。风机电源进线包括两路:(1)通过接触器 KM1 直接从进线接入工频电源;(2)通过变频器以及 1KM 接触器接入变频电源。

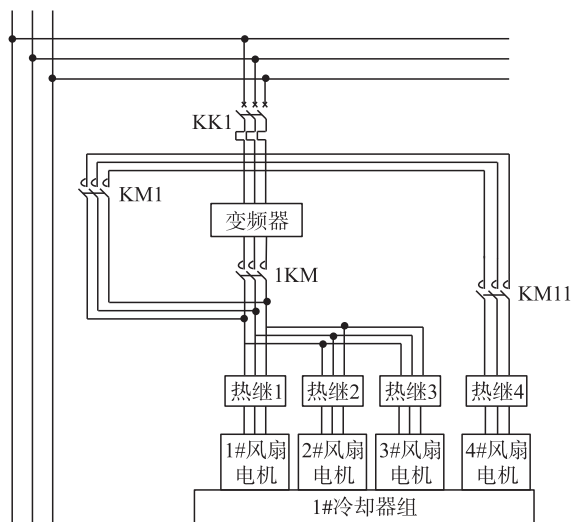


图1 主变风机变频控制柜1#冷却器组电源接线图

主变风冷控制柜通过进线断路器 KK1 和接触器 KM1 从三相进线接入工频保护电源,通过进线断路器 KK1 从三相进线接入变频器的三相供电电源。其中变频器的变频电源出线端接入接触器 1KM,为了保证变频电源和工频电源不会同时接入风机进线端子,在变频器输出端的接触器 1KM 和工频电源的出线端接触器 KM1 选择具有机械互锁的组合式接触器。在设计电气控制逻辑时,通过工频进线接触器 KM1 的辅助触点以及变频进线接触器 1KM 的辅助触点设计成为电气互锁,实现风机电源的双重保护。

实际使用中,主变一般有 4 组、6 组或者 8 组冷却器。以 4 组冷却器为例,第一组冷却器的电源由进线断路器 KK1 引入,第二组冷却器的电源由进线断路器 KK2 引入,第 3 组冷却器的电源由进线断路器 KK3 引入,第 4 组冷却器的电源由进线断路器 KK4

引入。在系统投入运行前,将 4 个进线断路器投入。然后有 PLC 控制器根据采集到的主变油温参数对 4 组风机分别控制,以满足不同的冷却容量需求。

1.2 主变风冷控制柜控制策略设计

1.2.1 主变油温控制逻辑

变压器顶层油温控制逻辑如图 2 所示。通过 PLC 控制器控制风机输出风量的大小,达到调节主变顶层油温的目的。系统通过部署在主变内部的温度变送器采集油温温度,将温度信号转化为 4 mA~20 mA 的标准信号,通过 PLC 的采样模块转化为数字信号,送至 PI 调节器,同 PLC 控制初始设定的温度值进行比较,然后按比例积分的规律发出变频器变频指令,其指令通过变频器和风机转变成风流量的增减信号,使得冷却器的冷却功率变化,以达到控制变压器顶层油温的目的。

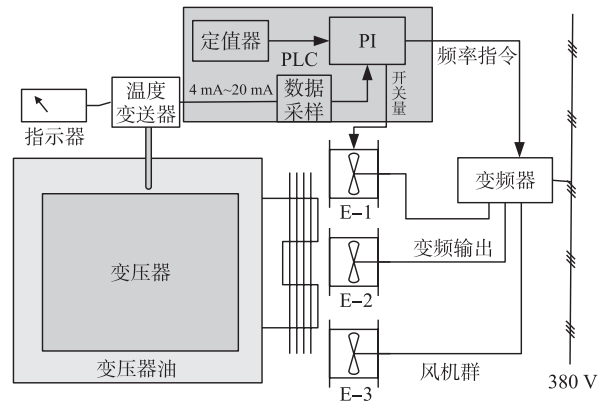


图2 主变顶层油温控制逻辑图

1.2.2 PLC 控制器控制策略设计

本主变风冷控制柜通过柜门上的“手动/自动”旋钮来选择风机和油泵的控制方式。“手动”方式可控制任意风机或油泵的在工频下的启停,用于检修情况。“自动”方式下有 3 种模式:(1)变频运行模式;(2)投切运行模式;(3)安全运行模式。

1.2.2.1 控制策略主程序设计

本文所设计的控制策略主程序开始后,进入采集主变油温温度值和 PI 参数设定。根据所采集到主变油温值以及对 PLC 运行状况、变频器的运行状况,进入冷却器运行模式选择子程序。子程序包括 3 种:变频运行模式 (VariFreqMode)、投切运行模式 (SwitchingMode) 和安全模式 (SafeMode),如图 3 所示。

(1)在变频运行模式下,程序根据主变的油温值选择变频冷却器组数和变频器输出频率。在确定变频冷却器组数和运行频率之后,输出变频模式下接触器动作指令,然后再根据采集到主变油温值,进入 PI 控制子程序。最后由机柜内温度控制子程

序进行温度控制。

(2)在投切运行模式下,程序根据主变的油温值选择需要投入运行的冷却器数量。在确定投运冷却器投运数量之后,输出投切式下接触器动作指令,

然后,由机柜内温度控制子程序进行温度控制。

(3)在安全运行模式下,程序根据设定输出安全模式下接触器动作指令,然后,由机柜内温度控制子程序进行温度控制。

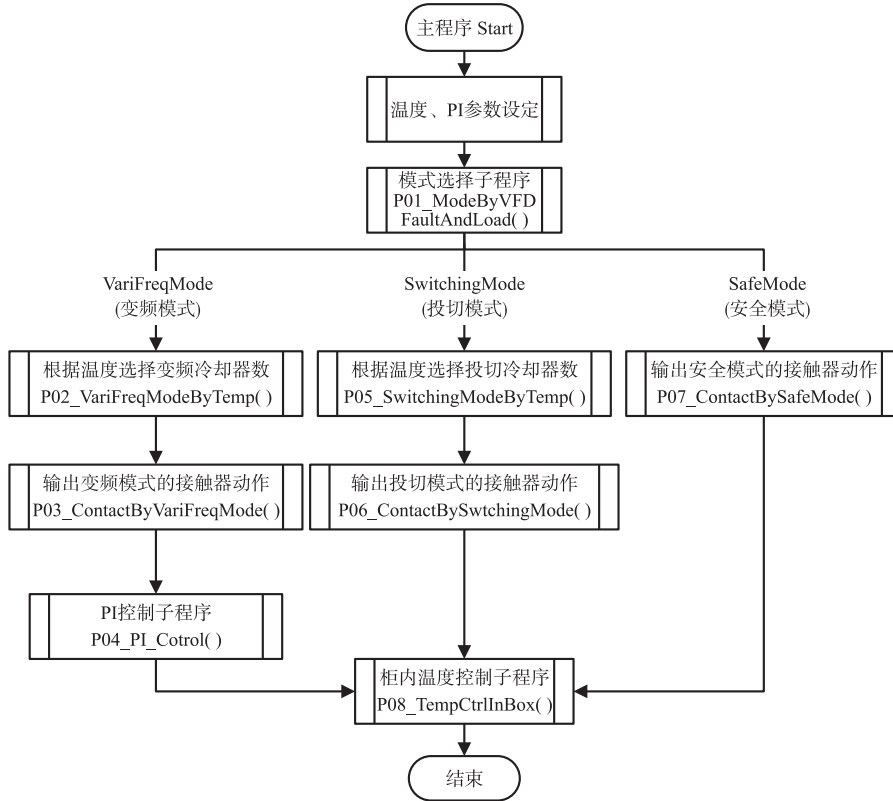


图 3 主变风冷控制柜控制策略主程序图

1.2.2.2 冷却器运行模式选择程序设计

如图 4 所示,冷却器运行模式选择程序开始后,将变频器上一时刻输出状态记录到变量 bVFDLastTimeState;然后根据采集到的主变负载率是否大于 110%进行判断,如果大于,则冷却器进入安全运行模式,同时点亮高温警报灯,同时判断变频器上一时刻状态,如果变频器处于运行状态,则关闭变频器,然后断开电源接线图中变频器输出接触器 1KM。如果主变负载率小于 110%,则继续判断负载率是否大于 100%,如果负载率在 100%与 110%之间,需要检测变频器输出接触器 1KM 是否闭合,如果闭合且变频器没有故障,则进入变频模式,如果 1KM 闭合且变频器出现故障,则进入投切模式,同时断开 1KM。如果主变负载率小于 100%,则判断变频器是否故障,如果变频器运行正常,则进入变频模式,如果变频器出现故障,则进入投切运行模式。

1.2.2.3 变频模式下冷却器运行模式设计

变频模式下, KK1 和 1KM 闭合, KM1 断开,风机变频运行,采用比例积分闭环反馈控制。根据实际运行需要,根据主变油温设定 3 种运行方式:(1)

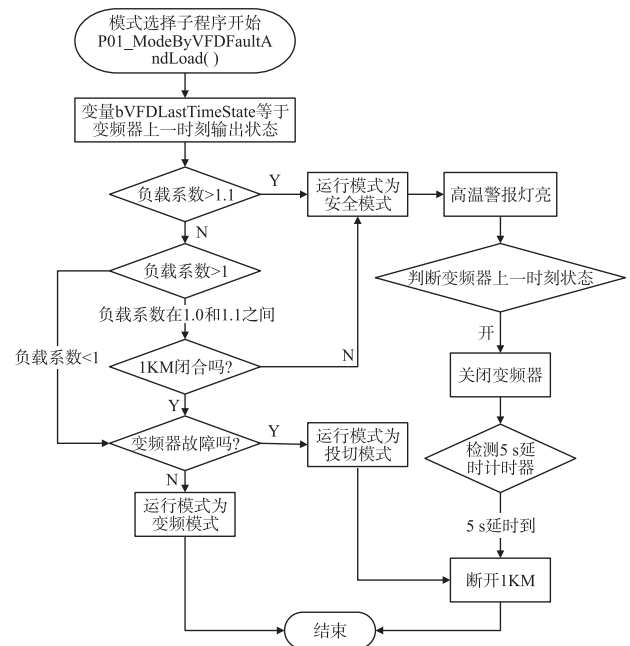


图 4 冷却器运行模式选择程序图

两组冷却器变频运行;(2)3 组冷却器变频运行;(3)4 组冷却器变频运行,如图 5 所示。

变频运行子程序根据采集到主变顶层油温值

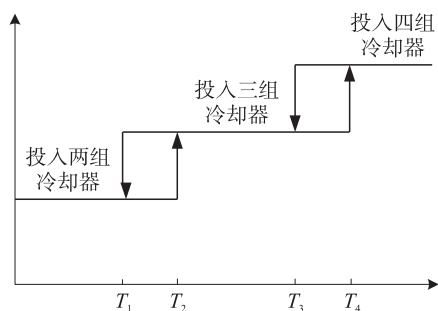


图 5 冷却器变频运行模式图

T , 选择投入变频运行冷却器组数。当 $T \leq T_1$ 时, 投入两组冷却器变频运行; 当 $T_1 < T \leq T_2$ 且上一时刻是两组冷却器变频运行时, 此时保持两组冷却器变频运行; 当 $T_1 < T \leq T_2$ 且上一时刻是 3 组冷却器变频运行

时, 此时保持 3 组冷却器变频运行; 当 $T_2 < T \leq T_3$ 时, 投入 3 组冷却器变频运行; 当 $T_3 < T \leq T_4$ 且上一时刻是 3 组冷却器变频运行时, 此时保持 3 组冷却器变频运行; 当 $T_3 < T \leq T_4$ 且上一时刻是 4 组冷却器变频运行时, 此时保持 4 组冷却器变频运行; 当 $T > T_4$ 时, 投入 4 组冷却器变频运行。

1.2.2.4 投切模式下冷却器运行模式设计

投切模式下, KM1 闭合, 1KM 断开, 采用了 7 级投切, 风机在工频下回差控制, 通过接触器来控制风机和油泵的起停, 最大程度地将温度控制在设定值附近, 并节约电源。投切模式时, 为保证主变运行安全, 第一组冷却器的风机和油泵一直保持投入状态。冷却器投入组数随温度变化而调整如图 6 所示。

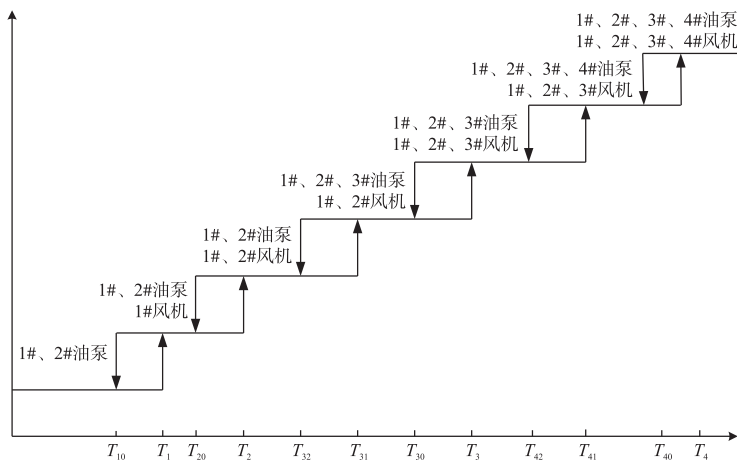


图 6 冷却器投切运行模式图

1.2.2.5 安全模式下冷却器运行模式设计

当 PLC 故障或 PLC 采集到主变油温超过设定温度值时, 主变风冷控制柜进入安全运行模式。在安全运行模式下, 为保证主变的安全运行, 启动所有冷却设备, 直至现场人为干预或者设备故障返回。当主变负荷超过设定值时, 主变风冷控制柜直接由变频运行方式或投切运行模式转入安全运行模式, 直至负荷低于设定值。

1.2.3 主变温度参数分析

变压器运行时, 如果选择冷却器投入与切除的动作值, 将会使冷却控制柜的损耗最小。合适的静态工作点, 也利于温度的 PI 控制。

1.2.3.1 变压器损耗参数分析

变压器的损耗和外界环境温度是引起变压器温度变化的主要原因。变压器损耗 ΔP 包括空载损耗 P_0 和负载损耗 P_k [6-7]。负载损耗正比于负载电流的平方, ρ 为负载系数, 等于实际电流与额定电流的比值。如式(1)所示:

$$\Delta P = P_0 + \rho^2 P_k \quad (1)$$

1.2.3.2 变压器绕组对油温升参数分析

变压器运行时产生的损耗转变成热量, 当油流经发热的绕组时, 热量就从绕组传到油中。油在流动中温度不断发生改变, 从而绕组最热点温度和变压器顶层油温形成一定的温差 T_d (°C) [8], 计算公式如(2)所示:

$$T_d = T_{dn} p^{2n} (1/d)^{0.3} \quad (2)$$

式中: T_{dn} 为额定负载下绕组最热点温度与顶层油温温度之差; d 为冷却器的运行率 (实际投入的冷却容量除以额定负载下投入的冷却器容量); n 为常数, 与冷却方式有关, 一般可取 $0.8^{[9-10]}$ 。

1.2.3.3 变压器油温对外界环境温升参数分析

由于冷却系统的控制量一般取的是变压器上层油温, 所以这里的油温对外界环境的温升取的是上层油温与外界空气的平均温差。油温对外界环境的温差包括油与油箱壁的温差, 油箱壁与外界环境的温差。一般来讲油与油箱壁的温差在 3 °C 到 6 °C 之间, 油箱壁与外界空气的温差占到总温差的 90% 左右 [11]。热量主要通过对流和热辐射两种形式从

油箱壁向外界散发。油温对外界环境的温升(℃)^[12],可通过式(3)、式(4)计算:

$$T_{oil} = \frac{1}{d} T_{on} \left(\frac{1+R\rho^2}{1+R\rho} \right)^n \quad (3)$$

$$T_H = T_{out} + T_d + T_{oil} = T_{out} + T_{dn} \rho^{2n} (1/d)^{0.3} + \frac{1}{d} T_{on} \left(\frac{1+R\rho^2}{1+R\rho} \right)^n \quad (4)$$

式中: T_{oil} 为主变顶层油温, T_{on} 为额定负载时主变顶层油温, R 为损耗比(铁损/铜损), T_H 为绕组热点温度, T_{out} 为外界环境温度, T_d 为绕组最高温度对绕组顶部油温的温差, T_{dn} 为额定负载时绕组热点温度对绕组顶部油温的温差。

选择标准环境温度时,以在青海某 330 kV 变电站容量为 180 MVA 的 1#主变为设计对象,可依据 GB/T 15164-94《油浸式电力变压器负载导则》,选用该型号的变压器的典型热特性数据^[13]。当主变满负荷运行时,根据变压器冷却系统的运行策略,此时投入 3 台冷却器,冷却器的运行率 $d=1$ 。此时将热特性数据代入式(4)可以计算得该系统绕组热点温度与负载率的变化曲线如图 7 所示。可以看出,变压器负荷率对温升的影响是非线性的关系。且负荷率越高,绕组热点对油温的温升越大,绕组热点温度上升得越快^[14]。

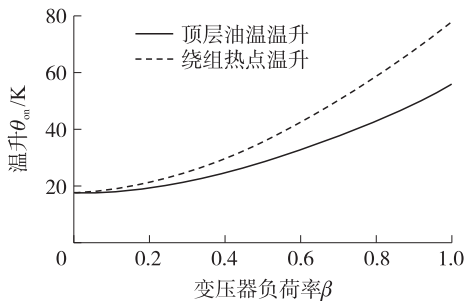


图 7 主变负荷率与温升关系图

2 主变风冷控制柜节能效果分析

冷却系统所选用的风机是按照系统所需要的最大风量来选择的,但实际使用时,通常不需要那么大的冷却容量。单台风机的风量 Q 、风压 p_f 、转速 n 、轴功率 P 、转矩 T 有以下关系^[15]:

$$Q = C_1 n \quad (5)$$

$$p_f = C_2 T = C_3 n^2 \quad (6)$$

$$P = T \cdot n = C_4 n^3 \propto Q^3 \quad (7)$$

由于风机风量 Q 与冷却容量近似成正比关系,冷却容量正比于投切率 g ,则风机功率与 g 成三次方关系。变压器顶层油温温升的时间常数为 5 min,其传输函数可近似为 $K \frac{1}{1+300s}$ 。以式(4)与该传输

函数建立变压器与风机的含 PI 反馈的控制系统模型^[16],如图 8 所示。

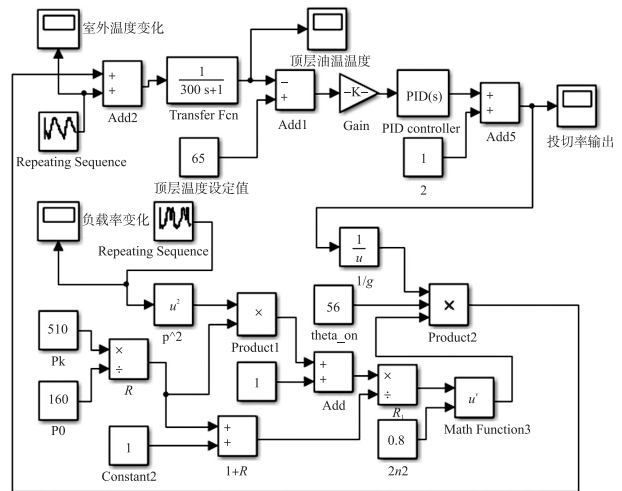


图 8 风机 PI 反馈控制系统模型

选择试点 330 kV 的变电站所在地冬季典型日的气温和变压器的负荷率进行节能分析。该变压器共 4 组冷却器,每组冷却器带 3 个 2.5 kW 的风扇,变频器效率为 96%。经仿真计算,顶层油温设定为 65℃,采用变频的冷却系统的功率与传统工频运行方式进行对比,传统工频投切模式每天用电 372.1 kW,变频运行方式每天用电 235.8 kW,每天可节省 36.6% 的电量。

3 结论

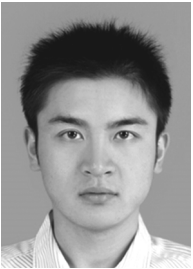
本文所设计的基于 PLC 和变频器的主变风冷控制柜,根据变压器顶层油温的变化,采用比例积分方式,通过 PID 反馈来控制冷却器的投切和风扇转速,以实现冷却器的最优节能。该控制柜目前在青海省格尔木某 330 kV 变电站内运行稳定,运行一年多来,经实际测量,与原传统风冷控制柜相比节能率在 35% 以上,实现年节约电能 47 707 kWh。

参考文献:

- [1] 李晓慧. 可编程控制器及变频技术在变压器风冷却器系统中的应用[J]. 广东电力, 2006, (11): 59-61.
- [2] 汪晶, 谭清岩, 王舒琴, 等. 大型强油风冷循环变压器应急风冷电源的研制[J]. 陕西电力, 2015, (5): 37-40.
- [3] 康真, 张梅. 一种新型变压器风冷控制系统的设计[J]. 电网与清洁能源, 2010(10): 23-25.
- [4] 李菊, 王永兰, 李春明. 大型电力变压器强油风冷系统建模与仿真[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2015(1): 25-29.
- [5] 刘志远, 于晓军, 梁守硕, 等. 一种变压器风冷控制系统多机保护定值整定方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, (19): 133-137.
- [6] 胡跃辉, 黎福海, 庄洪波, 等. 主变压器风冷系统控制装置[J]. 仪表技术与传感器, 2008(6): 88-90.
- [7] JB_T_8315-2007. 变压器用强迫油循环风冷却器[S]. 北京:

中国标准出版社,2007:65-66.

- [8] 胡炫,朱虎,杨志. 高压变频器在发电厂引风机上的应用与节能分析[J]. 电机控制与应用,2010,37(2):37-39.
- [9] 黎贤铤. 电力变压器冷却系统设计[M]. 杭州:浙江大学出版社,2009:74-75.
- [10] Transformers-Part P. 7: Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers[S]. IEC standard,2005:60076-7.
- [11] 裴建芝. 电力变压器冷却系统技术改造及效益分析[J]. 价值工程,2016,(25):181-182.
- [12] 肖青青. 电力变压器冷却器自动控制系统设计[C]//甘肃省电机工程学会 2014 年学术年会论文集. 兰州,甘肃. 2014:747-763.
- [13] 马小光,王永宁,张弛. 基于 PLC 的油浸式电力变压器冷却系统智能控制装置研究[J]. 电子世界,2017(13):19-20.
- [15] 杨雅淞. 电力变压器冷却自动控制系统的设计与研究[D]. 天津:天津工业大学,2013.
- [16] 殷海双,王永安,段志伟,等. 风冷电力变压器冷却控制系统设计[J]. 制造业自动化,2014(18):101-103.



马润生(1989-),男,汉族,青海西宁人,国网青海省电力公司电力科学研究院,工程师,工学学士,研究方向为电源技术,mrsray@163.com;



王贺飞(1987-),男,汉族,江苏南京人,国电南瑞南京控制系统有限公司,工程师,工学硕士,研究方向为电力系统自动化,wanghefei@sgepri.sgcc.com.cn;



赵文强(1988-),男,青海西宁人,工程师,工学学士,研究方向为热动;



宋晓童(1990-),男,青海西宁人,工程师,工学硕士,研究方向为电源技术;



黄 堃(1985-),男,江苏南京人,高级工程师,工学硕士,研究方向为自动化,huangkun@sgepri.sgcc.com.cn。