

以太网通信下的永磁真空断路器合闸自动控制

刘德亮¹ 乔延华² 徐文起¹ 李建娜²
LIU Deliang QIAO Yanhua XU Wenqi LI Jianna

摘要

在对永磁真空断路器合闸远程控制时,都是以传感网络完成控制信号的传输,但是传感网络易受外界干扰,存在分合闸延迟时间较长、合闸误差率较高的问题。为此,深入研究基于以太网通信的远程控制技术,研究永磁真空断路器合闸自动远程控制方法。首先构建永磁真空断路器合闸控制主体电路简化结构,其中包含断路器本体、驱动电路和传感器;然后通过以太网通信技术,滤波处理后传输断路器状态信息数据;最后使用选相分闸控制,从而限制延时,实现精准控制。实验证明,所提出的控制方法下永磁真空断路器分合闸时间明显缩短,分闸时间在11 ms以内、合闸时间在18 ms以内且合闸误差率降低在0.3%以下,优于传统的传感网络方法。

关键词

以太网通信;真空;合闸;断路器;永磁

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.02.034

0 引言

永磁真空断路器是一种基于永磁机构和真空灭弧室的断路器。它的基本工作原理是,利用永磁机构驱动灭弧室,实现分闸和合闸操作。相较于传统的断路器,永磁真空断路器具有高可靠性、快速动作、低维护量等优点,永磁机构的结构简单、动作迅速、可靠性高、寿命长、驱动速度快,可以实现快速分闸和合闸操作。真空断路器的机械部件少、维护量低。因此,永磁真空断路器在电力系统中得到了广泛的应用。而如何实现永磁真空断路器合闸的自动远程控制,成为研究的热点^[1]。

现有永磁真空断路器合闸控制是通过PLC技术实现,通过传感器采集电网状态、线路状态等信号。根据采集的信号,判断是否满足合闸条件。如果满足合闸条件,则输出控制信号给永磁真空断路器。永磁真空断路器接收到控制信号后,进行合闸操作^[2]。还有学者^[3]通过变分模态分解(VMD)对高压断路器线圈电流进行分解并削波处理,提取关键时间点及对应特征值,实现合闸判定。但上述以传感网络为基础的远程控制方法的成本较高、技术要求高,通信过程中受外界干扰较多,计算处理产生一定延时。对此,本文将结合低成本的以太网通信计算,开展对永磁真空断路器合闸自动远程控制方法的设计研究。

1 构建永磁真空断路器合闸控制主体电路模型

构建永磁真空断路器合闸控制主体电路模型需要考虑到断路器的机械特性和电气特性^[3]。以下是一个简化的电路模型,包括断路器本体、驱动电路和传感器三个主要部分。

断路器本体:在断路器本体的电路模型中,主要包含触头、真空灭弧室、操作机构等部分。触头是电路的关键连接部分,当触头闭合时,电流可以通过触头;当触头打开时,电流被切断。真空灭弧室用于在断开电流时产生电弧,并通过真空环境快速熄灭电弧,实现电流的切断。操作机构是驱动触头运动的机械装置。

驱动电路:驱动电路是用于驱动断路器操作的电源和控制系统^[4],它包括电源、驱动器、控制器等部分。电源提供操作所需的能量,驱动器将电源的能量转换为机械能,控制器则根据控制策略对驱动器进行控制,实现断路器的合闸或分闸操作。

传感器:传感器用于检测断路器的状态,包括触头的位置、操作机构的运动状态、电流和电压等参数,并将状态信息反馈给控制器。

在合闸控制过程中,控制器根据传感器的反馈信息判断断路器的状态,并在适当的时刻发出合闸指令。驱动电路根据指令将能量传递给操作机构,使触头运动至闭合位置^[5]。在合闸过程中,控制器还会根据传感器的反馈信息对合闸过程进行调整,以确保合闸操作的准确性和稳定性。

根据上述对永磁真空断路器合闸控制主体电路模型的分析,假设电路在初始状态下,其电感初始电流记为 I_0 ,电容

1. 天津健智者行空调技术有限公司 天津 300011

2. 天津天狮学院信息科学与工程学院 天津 301700

[基金项目] 天津天狮学院“通信工程”重点专业建设项目 (ZDZY202101)

的初始电压记为 U_0 。将该电路模型看作是无源电路，电路处于零输入响应状态，则电路的方程为：

$$\begin{cases} u = L \frac{di}{dt} + R_i \\ i = -C \frac{du}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中： u 表示电容电压； i 表示电感电流； L 表示线圈等效电感值； R_i 表示线圈等效电阻值； C 表示操作电容的电容值。在此基础上，结合拉普拉斯变换对该微分方程进行求解^[6]。在电感和电容电感电流和电压初值时，此时将拉普拉斯变换代入到上述公式中，得到：

$$I(s) = \frac{U_0 + LI_0s}{Ls^2 + Rs + \frac{1}{C}} \quad (2)$$

式中： $I(s)$ 表示电流 i 的时域函数； s 表示拉普拉斯变换系数。在合闸的过程中，永磁真空断路器在到达指定位置后需要将开关关断，此时操作电路会进入到续流状态当中。当电感在放电时，会对电容器进行充电，使电感电流逐步减小，而电容电压则逐步上升。这一过程可以通过电路中的电压、电流和电阻等参数进行监测和控制。

在合闸过程中，电感会通过电流并产生磁场，该磁场将与断路器中的磁铁产生相互作用力，推动断路器的触头运动^[7]。当触头到达指定位置后，需要将开关关断，此时电感开始放电，并对电容器进行充电。随着电感的放电，电感电流会逐步减小，而电容电压则会逐步上升。

在这一过程中，通过控制电路中的电阻和其他元件的参数来调整电感的放电速度和电容器的充电速度。例如，通过增加电阻的值来减缓电感的放电速度，从而控制电容电压的上升速度。类似地，也可以通过调整电容器的容量来控制其充电速度。其参数含义与电容放电相同，但电流方向不同。在续流回路初始时，以 I_0 作为电感的起始电流， U_0 作为电容器的起始电压。在此基础上，对模型进行简化，以便更清晰地理解其工作原理。

简化时，电路的基本层次结构是保持不变的。反向电流在机构中的流动情况与正向电流类似，都是在电路中持续流动，直至达到稳态。因此，当在机构上施加反向电流时，其充满和继续流动的情况与正向电流相同，在此不再赘述。

短期闭合式永磁操动机构是一种具有类似结构的单稳态永磁操动机构^[8]。这种机构具有独特的优点，例如结构简单、操作方便、响应速度快等。它与传统的机械操动机构相比，具有更高的稳定性和更长的使用寿命。此外，由于其采用永磁材料，因此可以有效地减少能耗、提高能源利用效率。短期闭合式永磁操动机构与单稳态永磁操动机构相互绝缘，这

意味着它们在电路中不会相互干扰^[9]。因此，可以对它们进行单独操控，以满足不同的应用需求。在电力系统中，根据需要将短期闭合式永磁操动机构应用于断路器或负荷开关等设备中，以实现快速、准确地开关操作。在进行合闸自动选相控制时，通过将模拟出的电流波形和实际电流波形进行比较，并根据两者之间的差值适当地调整参数，使得机构的工作性能能够达到要求。在此基础上，通过对其进行正向激励、续流和反向激励，并对其进行建模，从而实现对各工作状态下的电容电压、电感电流的初始值初步的计算。

2 基于以太网通信的断路器状态信息数据传输

通过以太网通信，上节获得的断路器的状态信息，包括电流、电压、温度、合闸状态等，可以高速、稳定、实时传输到远程监控中心，使运维人员能够远程监控断路器的运行状态，为电力系统的数据分析和故障诊断提供实时、准确的数据支持。同时，远程控制指令也可以通过以太网通信传输到断路器，实现对断路器的远程合闸、分闸操作^[10]。

在复杂的电力系统中，多个断路器之间需要实现协同动作。以太网通信可以提供精确的时钟同步功能，确保各个断路器在精确的时间点进行合闸或分闸操作，保证电力系统的稳定运行^[11]。图 1 为以太网通信结构图。

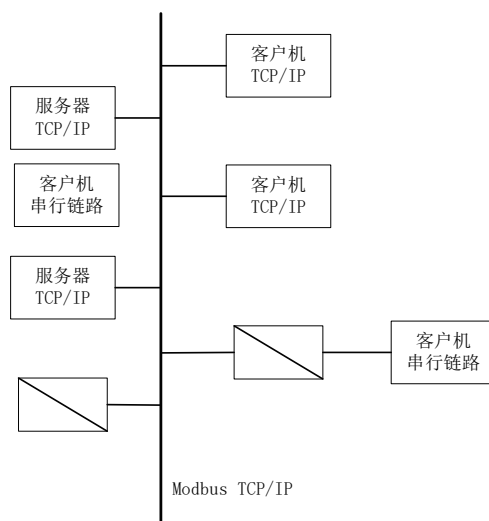


图 1 以太网通信结构图

受条件所限，以 PC 为客户端，以断路器控制器为终端。如果想要查询负荷回路的各种电气参数，如电流电压功率等，只要在 PC 机的监测界面上按下“获取信息”键，PC 机就会通过 Ethernet 将数据要求发送到断路器的控制单元，而控制单元在接收到请求信息后，则从对应的寄存器中取出所需的参数，并将其传输至 PC 监测接口进行显示。在对断路器状态信息数据进行传输前，需要对采集到的数据进行处理。以连续抽样获得的 N 个数字组成一个队列，将队列的间隔长度设为 N ，之后每次取样都将它放在队列的末端，除去队列开

头的第一个数据（先入先出原理），将队列内的全部数据分配给一个临时阵列，在该阵列中对 N 个数据进行排序，除去最大值与最小值，其余的数据用算术平均操作^[12]。采用这种方法，消除了噪声的影响，减少了外部的干扰，从而提高了采样的精度。该滤波器的最后滤波值是：

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^N X_i - \max(X_i) - \min(X_i)}{N - 2} \quad (3)$$

式中： Y 表示滤波器的最后滤波值； X_i 表示第 N 个样本的采样值； $\max(X_i)$ 表示样本集合中的最大值； $\min(X_i)$ 表示样本集合中的最小值。通过上述算法，实现对永磁真空断路器合闸控制过程中线圈电流、操作电容电压等参数的采集，并结合得到的滤波值对后续控制策略进行调整。

3 永磁真空断路器合闸自动选相远程控制

基于上述以太网通信，远程监控中心获得滤波后的断路器状态数据，根据状态数据进行分析，对永磁真空断路器进行合闸自动选相控制，控制对象主要为其内部的电磁机构和控制系统。选相控制的核心是在特定的时刻，通过对永磁操作机构进行精确的控制，使断路器合闸。这种控制方式可以减少断路器在合闸过程中的冲击力，从而提高断路器的使用寿命，同时也能提高断路器的操作速度^[13]。选相控制一般分为以下几个步骤。

第一步，确定合闸时刻：通过实时监测电网的电压和电流，根据电力系统的需求和断路器的状态，选择一个最佳的合闸时刻。

第二步，发出合闸指令：当确定合闸时刻后，控制系统会向永磁操作机构发出合闸指令。

第三步，永磁操作机构的响应：收到合闸指令后，永磁操作机构会根据指令进行合闸操作^[14]。由于永磁操作机构的特性，它可以在极短的时间内完成合闸动作。

第四步，反馈控制：在合闸过程中，控制系统会实时监测断路器的状态，如电流、电压等，并根据这些信息对合闸过程进行调整，以确保断路器能够在最佳的状态下完成合闸操作。

指定相角需要在经过多个时间才能够达到指定位置，选相指令发出后，需要确定延时的具体时间，公式为：

$$T_{deal} + T_{do} + T_{re} + T_{elay} = \frac{10\theta_{xuan}}{180} + KT/2 \quad (4)$$

式中： T_{deal} 表示延时时间； T_{do} 表示永磁真空断路器电流通电到合闸结束所需要的时间； T_{re} 表示光耦的响应时间； T_{elay} 表示 DSP 处理时间； q_{xuan} 表示设定的合闸角度； K 表示整数； T 表示电网周期。

通过收集到的电网电压，对电网过零进行判断，从命令发送后的第一次过零点起，延迟结束后，给闭合信号，线圈通电，使机构在规定的相角内完成闭合。该方法能够将断路器触头按一定的相角进行隔离，最好的时机为过零点，从而减小了动触头间的燃弧时间，从而提高了断路器的开断性能。同时，因燃弧时间的影响，使选相分闸控制延时的计算方式与合闸方式有很大区别^[15]。根据不同的选相条件，对延迟时间的计算进行了调整。虽然在运行方式上，选择相开、开合的总体运行流程没有变化，但是在运行方式上要考虑到各时刻的影响。在运用选相控制时，要注意理论和实践的需要，并根据工程应用中机械装置的作用时间特点，自动对延时时间进行适当的调节。

4 对比实验

4.1 实验准备

为了验证本文上述提出的基于以太网通信的自动控制方法在实际应用中的可行性，在实验过程中，利用位移传感器跟踪实际动触头的运动轨迹，并对永磁真空断路器刚合时间、分闸操作时间进行测定。实验环境如图 2 所示。



图 2 实验环境

同时，为了体现实验的可对比性，选择将本文上述提出的基于以太网通信的控制方法作为实验组，将基于 PLC 的控制方法作为对照 A 组（文献 [2] 方法），将基于 VMD 模式分量的控制方法作为对照 B 组（文献 [3] 方法）。在相同的实验环境和变量条件下，分别测定利用三种方法对永磁真空断路器合闸控制时的分闸时间和刚合时间，以此实现对三种控制方法控制性能的初步比较。在实验过程中，将永磁真空断路器容量设置为 $4700 \mu\text{F}$ 和 $47000 \mu\text{F}$ 两种，将电容电压设置为 170 V 、 180 V 、 190 V 、 200 V ，共四种类型，以此得到对应的 8 种不同控制条件。分别记录在不同控制条件下，三种控制方法对永磁真空断路器进行合闸控制时的分闸时间和刚合时间。

在完成上述实验操作后，为了进一步验证三种控制方法的控制精度，选择将永磁真空断路器合闸控制输出与设定值

之间的误差率作为评价指标，其计算公式为：

$$s = S/W$$
 (5)

式中： s 表示误差率； S 表示永磁真空断路器合闸控制输出； W 表示控制前实际设定值。通过上述公式计算得出 s 的具体取值， s 取值范围在0~1之间， s 值越接近0，则说明永磁真空断路器合闸控制输出设定值之间相差越大，对应控制方法的控制精度越低；反之， s 值越接近1，则说明永磁真空断路器合闸控制输出设定值之间相差越小，对应控制方法的控制精度越高。根据上述论述可以实现对三种控制方法控制精度的量化，从而更便于实现对三种控制方法控制性能的比较。同样，在上述设置的实验条件下完成控制精度的对比实验。

4.2 不同控制方法应用下分合闸时间对比分析

在完成上述实验准备后，为方便比较不同控制方法应用下分合闸时间，将得到的实验结果记录如表1、表2所示。

表1 三组控制方法应用下分闸时间对比表

容量/ μF	电容电压/ V	实验组分闸时间/ ms	对照A组分闸时间/ ms	对照B组分闸时间/ ms
4700	170	10.25	15.24	15.32
	180	10.28	15.65	15.85
	190	10.32	15.85	15.92
	200	10.36	15.95	16.08
47 000	170	10.68	15.68	15.75
	180	10.75	15.98	16.08
	190	10.85	16.15	16.24
	200	10.89	16.85	16.95

表2 三组控制方法应用下合闸时间对比表

容量/ μF	电容电压/ V	实验组合闸时间/ ms	对照A组合闸时间/ ms	对照B组合闸时间/ ms
4700	170	17.26	20.12	20.21
	180	17.36	20.35	20.42
	190	17.45	20.48	20.52
	200	17.55	20.67	0.85
47 000	170	17.46	20.48	20.53
	180	17.52	20.68	20.86
	190	17.62	20.86	21.24
	200	17.72	20.93	21.85

表1和表2记录了永磁真空断路器在不同容量和电容电压下的运行数据。对这些数据进行分析，可以得出以下结论。

随着电容电压和容量的增加，永磁真空断路器的运行环境逐渐变得复杂。这可能是由于随着电压和容量的增加，断路器需要承受的电流和电压应力也相应增加，导致其分闸和合闸时间增加。这表明，在高压大电流环境下，永磁真空断路器的操作性能会受到一定的影响。

在三种控制方法的应用下，实验组的永磁真空断路器展现出了最短的分闸与合闸时间。这可能是因为实验组控制方法在算法优化和响应速度方面具有优势，能够更好地适应复杂的运行环境。对照A组和对照B组的分闸与合闸时间相对较长，这可能是因为它们的控制方法在处理复杂环境下的操作时存在一定的局限性。

随着电容电压和容量的增加，实验组控制方法应用下永磁真空断路器的分闸时间和合闸时间变化幅度最为缓慢。这表明实验组控制方法在面对高压大电流环境的变化时，具有更好的稳定性和鲁棒性。对照A组和对照B组在高压大电流环境下的分闸时间和合闸时间变化幅度较大，这可能意味着它们在应对复杂环境时的适应能力有待提高。

综合实验数据，可以得出结论，实验组控制方法在永磁真空断路器的控制性能方面表现最佳。这一方面是因为实验组控制方法在算法优化和响应速度方面的优势，另一方面也归功于其在复杂环境下的稳定性和鲁棒性。因此，采用实验组控制方法有望实现永磁真空断路器的快速分合闸，从而进一步提高其运行效率。这对于电力系统的稳定运行和高效配电具有重要意义。

4.3 不同控制方法应用下合闸精度对比分析

在初步实现对本文控制方法应用优势的验证后，再对三种不同控制方法应用下合闸精度进行对比分析。首先将4700 μF 条件下电容电压变化过程中，三种控制方法应用下的永磁真空断路器合闸误差率绘制如图3所示。

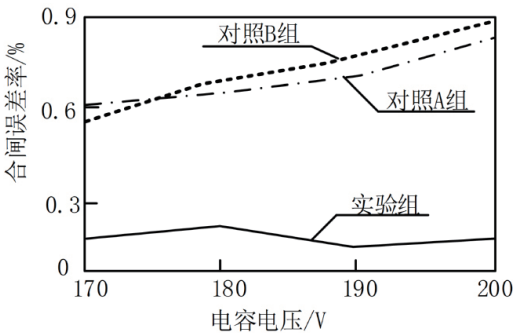


图3 4700 μF 容量下永磁真空断路器合闸误差率

根据图3中三条曲线的变化分析，可以看到在4700 μF 的容量下，实验组的永磁真空断路器合闸误差率始终控制在0.3%以下，且该误差率并未随着电容电压的增加而呈现出逐渐增加的趋势。相对而言，对照A组和对照B组控制方法应用下的永磁真空断路器合闸误差率始终高于0.6%，且随着电容电压的增加，误差率呈现出明显的递增趋势。这表明实验组的控制方法在控制精度和稳定性上具有显著优势。为了更直观地呈现这一结果，将47 000 μF 条件下电容电压变化过程中，三种控制方法应用下的永磁真空断路器合闸误差率绘制

成了图4。

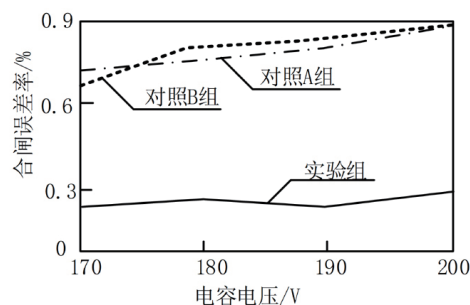


图4 47 000 μF 容量下永磁真空断路器合闸误差率

从图4中可以看出,与图1项目在47 000 μF 容量条件下,三组永磁真空断路器的合闸误差率均出现不同程度地上升。然而,实验组的合闸误差率仍然未超过0.3%,且并未受到电容电压变化的影响。对照A组和对照B组的合闸误差率均超过0.6%,且电容电压的变化对其合闸误差率的影响较大。

综合上述实验结果,得出以下结论,实验组控制方法在控制精度和稳定性方面具有显著优势。在4700 μF 和47 000 μF 的容量条件下,实验组的永磁真空断路器合闸误差率均未超过0.3%,表现出极高的控制精度。此外,实验组合闸误差率并未随着电容电压的增加而增加,说明其具有较好的稳定性。对照A组和对照B组的控制方法在控制精度和稳定性方面均不如实验组。

5 结语

基于以太网通信的永磁真空断路器合闸自动控制方法在电力系统中具有广泛的应用前景。该方法采用以太网通信技术,可以实现远程控制和实时监控,提高断路器的自动化水平。然而,该方法也需要解决一些技术难题,例如网络延迟、数据传输安全性等。未来,将进一步改进和完善该方法,为电力系统的安全稳定运行提供更加可靠的保障。

参考文献:

- [1] 李旭,杨倬,郭歌,等.一例330 kV变电站断路器带合闸电阻过电压校核计算[J].江西电力,2023,47(5):15-18+27.
- [2] 于朝,王孙清,张炜,等.基于PLC的ABB断路器控制程序设计[J].船电技术,2023,43(8):62-64+68.
- [3] 范想,吐松江·卡日,王德金,等.基于VMD模态分量的高压断路器分合闸线圈电流特征值提取[J].现代电子技术,2023,46(20):107-112.
- [4] 陈振家,盛建华,陆俊阳,等.操作电压对断路器机械特性分合闸时间影响的分析[J].中国新技术新产品,2023(19):66-69.

- [5] 孙雷强,庄劲武,王冲,等.基于联合仿真的断路器合闸电磁铁的动态特性研究[J].电气工程学报,2023,18(1):104-110.
- [6] 王洪一,王洪俭,黄杰,等.多维度可调式开关柜断路器应急分合闸操作台的研制[J].电子产品世界,2023,30(9):48-53.
- [7] 陈冠,张翔,仇式鹏,等.基于分合闸回路电流波形特征的开关柜断路器故障诊断技术研究[J].内江科技,2023,44(8):21-22+20.
- [8] 孙庆峰,屠晔炜,付军,等.1100 kV GIS断路器合闸电阻紧固螺栓断裂分析[J].浙江电力,2023,42(8):68-74.
- [9] 刘康,温定筠,包艳艳,等.750 kV罐式断路器合闸电阻操动冲击下应力分布数值模拟及影响因素分析[J].高压电器,2023,59(8):180-185.
- [10] 王佳琳,钱帅伟,彭彦军,等.基于行波反射法的 SF_6 断路器分合闸线圈匝间短路故障定位研究[J].机电工程技术,2023,52(6):211-216.
- [11] 马飞越,相中华,倪辉,等.750 kV滤波器场断路器合闸电阻预投入异常仿真[J].高压电器,2023,59(6):65-73+102.
- [12] 赵兴永,李传东.高压断路器合闸故障的快速查找方法[J].电世界,2023,64(4):12-16.
- [13] 张佳琪,林向宇,刘煌煌,等.VD4真空断路器分合闸信号异常分析与防范[J].电世界,2023,64(4):26-27.
- [14] 王鸿,江金成,殷红霞,等.一起750kV交流滤波器断路器合闸电阻故障案例分析[J].东北电力技术,2023,44(7):46-52+57.
- [15] 陈昊,徐伟伦,沙浩源,等.高压断路器分合闸振动过程突变点的两阶段辨识方法[J].电器与能效管理技术,2023(1):28-33+49.

【作者简介】

刘德亮(1980—),男,天津人,本科,工程师,研究方向:电子科学与技术。

乔延华(1982—),女,天津人,硕士研究生,副教授,研究方向:移动通信、电器可靠性及现代设计技术。

徐文起(1976—),男,天津人,本科,高级工程师,研究方向:物联网。

李建娜(1982—),女,天津人,硕士研究生,讲师,研究方向:物联网通信。

(收稿日期:2023-12-05)