DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)02-0034-05.

基于有载分接开关的变压器动作控制方法

郑 宇，黄 剑，吴鑫剑，王祝露，姜楠楠

(国网浙江省电力有限公司衢州供电公司,浙江 衢州 324000)

摘 要: 为降低变压器无功功率损耗.本文通过调整有载分接开关.设计了一种变压器动作控制方法。在分析有载分接开关调控原理的基础上,采用大容量补偿技术检测变压器的无功功率、电流、电压、功率因数等被控量。打开变压器低压面双向晶闸管.连接补偿回路与高压面,通过高压面产生的励磁阻抗控制有载分接开关。利用变压器和开关组成“磁控开关”,可以通过双向晶闸管频繁投切,从而实现对变压器空载合闸与投切动作的控制。实验结果表明方法可以有效控制变压器的空载合闸与投切,且通过开关漏抗还可以完成补偿电容投切操作。

关键词: 变压器;投切动作控制;无功补偿

中图分类号:TP273 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)02-0034-05

Control Method for Transformer Operation Based on on-load Tap-changer

ZHENG Yu, HUANG Jian, WU Xin-jian, WANG Zhu-lu, JIANG Nan-nan

(State Grid Zhejiang Electric Power Corporation Quzhou Power Supply Company, Quzhou 324000 China)

Abstract: In order to reduce the reactive power loss of transformer, this paper designs a transformer action control method by adjusting the on load tap changer. Based on the analysis of the regulation principle of on load tap changer, the large capacity compensation technology is used to detect the reactive power, current, voltage, power factor and other controlled variables of the transformer, open the two-way thyristor on the low voltage side of the transformer, connect the compensation circuit with the high voltage side, and control the on load tap changer through the excitation impedance generated by the high voltage side. The "magnetic switch" composed of transformer and switch can be used to control the no-load closing and switching of transformer through frequent switching of bidirectional thyristor. The experimental results show that this method can effectively control the no-load closing and switching of the transformer, and can also complete the switching operation of the compensation capacitor through the leakage reactance of the switch.

Keywords: transformer; switching action control; reactive compensation

0 引言

由于近些年来国民经济迅速发展,电网负荷压力大,无功功率损耗严重,需要对变压器合理控制减少用电损耗。变压器作为电网的关键构成部分,其故障可能引发区域性停电,因此,确保变压器的正常运行是维持电网稳定运作的关键措施。有载分接开关是变压器中唯一的可动组件,通过精确调控该开关,能够有效实现变压器空载合闸及投切操作的控制。这一机制对于维持电网电压的稳定性和提升电网的灵活性至关重要[1]。

文献[2]融合了多个固有模态函数与变换法,对特征向量进行深入的时频分析,并据此提取特征。随后,采用经过优化的BP神经网络模型,实现了对变压器有载分接开关运行状态的精确识别。该方法可以有效检测出开关运行状态,但难以对有载分接开关进行故障维护;文献[3]将运行方式、结合控制参数与优化策略,本文实施了减少变压器操作频次的措施,并实现了有载分接开关的精准档位调节。该方法可以降低变压器故障风险,但难以控制变压器合闸动作。

基于上述分析,本文提出基于有载分接开关的变压器动作控制方法,通过大容量无功补偿技术打开变压器低压面双向晶闸管,将补偿回路与高压面相连,高压面会产生励磁阻抗达到磁控开关效果,完成变压器合理有效控制。而有载分接开关的吊芯检查是变压器主要检修项目之一,变压器需要使用吊芯装置将有载分接开关里的铁芯进行检测与维修,合理控制变压器,确保用户用电安全,及时解决变压器故障问题,更好地满足供电需求。

1 变压器动作控制方法设计

本文通过调控有载分接开关来控制变压器的空载合

*基金项目:国家电网公司科技项目(5804DY170912)

收稿日期:2023-08-17

闸与投切,从而实现对变压器动作的控制。

1.1 有载分接开关调控原理分析

采用高功率半导体器件能够增强有载分接开关的电压承受能力。将有载分接开关与变压器相结合,能构造出一种“磁控型开关”。当变压器的双向晶闸管处于断态时,会形成一个比补偿电容的容抗更大的阻抗,此时支路电流等同于空载电流,表明补偿未激活,系统处于空载模式。相反,若变压器中的双向晶闸管导通,将导致励磁阻抗减小,并触发补偿电容的投入工作。这时,磁控开关被激活,支路电流开始进入补偿运行阶段[4]。

为了调控变压器低压侧的双向晶闸管开关,设计一套无功补偿操作策略,该策略基于变压器短路和励磁阻抗的条件,将变压器高压侧的补偿电容投切操作转化为无功功率的补偿。

为此,本文引入了大容量无功补偿技术,以对有载分接开关进行磁控处理。这一处理过程通过一个由检测单元、逻辑控制单元、执行单元与保护单元构成的调控模型来实现,其调控机制如图1所示。

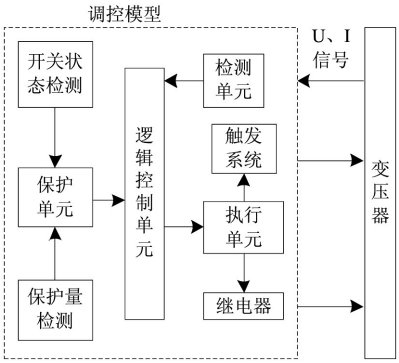


图1 大功率无功补偿技术的智能调控原理图

在图1所示的场景中,检测单元不断地接收来自变压器的电压(U)和电流(I)信号。逻辑控制单元利用这些U、I信号进行计算,以得出系统的功率因数,并基于电压功率因数的校验数据来决定何时进行投切操作,随后将产生的控制指令发送给执行单元。执行单元则根据这些指令来控制晶闸管、断路器以及接触器等设备的工作状态。与此同时,保护单元持续监控所有开关的状态以及变压器、电容器等被保护组件,一旦检测到故障,它会立即根据预设的保护参数进行应急处理,确保补偿装置的每个组成部分都能安全运行[5]。

1.2 有载分接开关吊芯检测

为避免因有载分接开关自身原因影响对变压器动作的控制效果,在控制前,需检测开关内部磁芯状态,具体过程如下:

步骤1:用六角螺丝将吊芯装置底座固定在变压器周围,两底座中心点与变压器边缘线平行,确保变压器边缘线与井仓口法兰中心线距离相同;

步骤2:吊芯装置的两根支撑柱底部分别固定两个底座上;

步骤3:确保在吊检过程中电动葫芦的钢丝绳下端挂钩在竖直下放后能位于井仓口法兰中心上,将卡扣、垫片、电动葫芦、垫片、卡扣依次穿入横梁,调整位置并将卡扣固定;

步骤4:用固定螺丝将横梁固定在支撑柱顶部;

步骤5:使用电机操控杆带动涡轮,使支撑柱向变压器内侧倾斜,将挂钩刚好置于井仓口法兰中心正上方[6];

步骤6:操控遥控器将钢丝绳放下,下放挂钩,使挂钩钩住芯体;

步骤7:操控遥控器卷起钢丝绳,吊起芯体直至芯体完全脱落进仓;

步骤8:两侧同时使用电机操控杆带动涡轮,向变压器外侧倾斜支撑柱,使芯体完全离开变压器平台,直至芯体检修点正上方;

步骤9:操控遥控器将钢丝绳放下,将芯体放到指定位置完成吊检。

1.3 变压器被控量的检测

无功补偿装置能够有效计算出无功补偿功率,并准确计算无功功率、电流、电压、功率因数等被控量[7−8]。在平衡的三相电力系统中,相电流与相电压均呈现为正弦波形且相互对称,负载表现为线性特性。设该系统中的三相电压与电流分别表示为u_a、u_b、u_c和i_a、i_b、i_c。

电网每相瞬时功率用p表示,计算公式为:

$$p=\left(u_a+u_b+u_c\right)\left(i_a+i_b+i_c\right) \tag{1}$$

瞬时功率在周期T内叠加之和为每相有功功率P,公式为:

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T p\mathrm{d}T \tag{2}$$

将接收到的电压信号做$\frac{3}{2}\pi$处理,可得出:

$$\begin{cases}u_a'=\sqrt{2}U\cos w_0t\\ u_b'=\sqrt{2}U\cos\left(w_0t-\dfrac{2}{3}\pi\right)\\ u_c'=\sqrt{2}U\cos\left(w_0t+\dfrac{2}{3}\pi\right)\end{cases} \tag{3}$$

其中,W_0表示电压相角。与有功功率计算相同,电压u_a'乘电流i_a,在一定周期内积累,得出每相基波无功功率Q,计算公式如下:

$$Q=\frac{1}{T}\int_0^T u_a'i_a\mathrm{d}T \tag{4}$$

利用P和Q计算获取每相视在功率,计算公式为:

$$S=\sqrt{p^2+Q^2} \tag{5}$$

根据公式(5)得出功率因数计算公式为：

$$\varphi = \frac{P}{S} \tag{6}$$

结合以上检测方法，可在一个周期内数据叠加，即可得出基波无功功率与功率因数，并且该方法不会被电流中谐波分量影响，得出数据精度较高。

1.4 应用大容量补偿技术控制变压器被控量

大容量无功补偿技术在应用时，通过开启变压器低压侧的双向晶闸管，使补偿回路与高压侧实现连接。此过程中，高压侧会产生励磁阻抗[9−10]，从而实现了磁控开关的功能。针对不同投切补偿电容的控制需求，大容量无功补偿技术的控制策略需作出相应调整。一个高效的控制策略旨在无需补偿时最大化系统功率因数，同时有效规避投切振荡与冲击等问题。为此，提出了一种复合型控制策略。该策略以无功功率和功率因数为判断基准，综合考量多个物理量作为被控对象。这种控制方式融合了多种因数控制方法的优势，显著提升了电容补偿的精确度。

在具体实施层面，采用了基于电压和功率因数的四区图控制方法。复合控制的判断依据是系统电压与功率因数。根据$cos\varphi_H$和系统电压的上下限，将系统U−$cos\varphi$运行图划分为四个不同的控制区域，如图2所示。

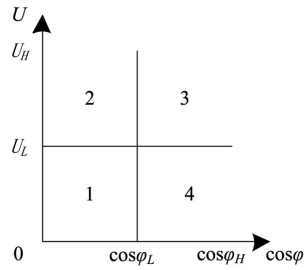


图2 电压功率因数复合控制

在图2所示的控制策略中，U_H和U_L界定了系统母线电压的安全范围，而$cos\varphi_H$和$cos\varphi_L$则代表了系统功率因数阈值区间。该控制机制的核心在于，通过投入补偿电容，可以同时提升系统的功率因数和电压水平。具体操作时，系统会根据实时采集的电压与电流数据，计算当前的功率因数，并以此为基准，结合四区图判断系统当前所处的状态区域。随后，系统会根据预设的控制策略，自动执行相应的控制动作。

在1区，即电压低于设定下限的情况下，系统会采取逐级投入电容器组的策略；进入2区，即电压处于正常范围内时，系统会继续逐级投入电容器组，直至满足补偿需求，保持功率因数和电压的稳定；若系统进入3区，即电压高于设定上限，此时装置将判断为无法继续有效控制，随即退出系统并发出警报；而在4区，即电压同样高于上限但系统尚未发出警报的情况下，系统会逐步分级切断电容器组，以防止电压进一步升高[11]。

通过这一综合控制策略，系统能够有效地平衡无功功率，稳定电压水平，特别是在轻载条件下，能够显著降低补偿电容频繁投切的风险，同时在重载时，也能有效弥补功率的不足，确保系统的稳定运行。

1.5 空载合闸与投切动作控制

上述研究中，应用大容量补偿技术对变压器的多个被控量实施了控制。然后打开变压器低压面双向晶闸管，连接补偿回路与高压面，通过高压面产生的励磁阻抗控制有载分接开关。

在这一过程中，由变压器和开关组成的“磁控开关”通过双向晶闸管频繁投切，从而实现对变压器空载合闸与投切动作的控制。但在实施控制之前，首先应分析变压器的损耗情况，为后续的补偿电容投切提供依据[12]。

变压器主回路通断皆由双向晶闸管决定。在投切时，双向晶闸管电压为零时触发接通较小电流；断电时双向晶闸管为零后自动断开无冲击。双向晶闸管是电子开关，所以可以频繁投切。

KM2所承受的电压则受到电容器的制约。在此过程中，尽管开关动作可能导致接触部件磨损，但这并不影响投切操作的执行。

在变压器空载状态下，如果不设置阻尼电阻，将电路铁芯直接与电容器连接，则电路会受到外界因素影响产生铁磁谐振。因外界因素影响电路平衡，铁芯磁链需要过渡周期维持磁链守恒，叠加分量后铁芯会进入饱和状态，与电容产生谐振。铁芯磁链的产生源于瞬时的铁芯饱和现象。为了消除由此引发的谐振，可通过引入合适的阻尼来吸收谐振能量，促使铁芯退出饱和状态，从而有效抑制谐振。

变压器空载时，损耗以铁芯损耗为主。此时，变压器具有较大的励磁电抗(典型值为100)，空载电流的计算公式为：

$$I_0^* = U_s^* / X_m^* = 1/100 = 0.01 \tag{7}$$

其中，U^*_s表示空载状态下的变压器电压，X^*_m表示变压器产生的励磁电抗。

当变压器阻尼电阻阻值与补偿电容机器的容抗值一致时，阻尼电阻公式为：

$$R^* = X_c^* = 1 \tag{8}$$

在空载稳态下阻尼电阻的电流为：

$$I_R^* = I_0^* / \sqrt{2} = 7.071\times10^{-3} \tag{9}$$

其中，I^*_0表示变压器产生的励磁电流。

依据公式(8)、公式(9)可知，变压器每条支路三相阻尼电阻有功消耗为：

$$P_R^* = 3I_R^{*2}R^* = 1.5\times10^{-4} \tag{10}$$

当变压器空载时，阻尼电阻产生的损耗为：

$$P = P_R^* S_B = 1.5\times10^{-4}\times3\times10^6(\mathrm{W}) = 450\,\mathrm{W} \tag{11}$$

当变压器处于投切补偿状态时，双向晶闸管产生短路现象，假设短路电抗为X_k，则变压器一侧电压为：

$$U_1 = \frac{X_k}{X_c - X_k}U_s \tag{12}$$

其中，U_s代表系统相电压。

在投切过程中，特定数量电流短时间通过电流电阻，所以电阻在投切过程中损耗小，可以忽略不计。

综上所述，利用变压器和开关组成的“磁控开关”，实现了对变压器空载合闸与投切动作的控制。

2 实验分析

2.1 实验参数

为检验本文所提方法的实际效用与可行性，选取了一台110 kV的变压器作为试验对象，实施了空载合闸试验及投切操作试验，试验所用样机的具体参数参见图3及表1。

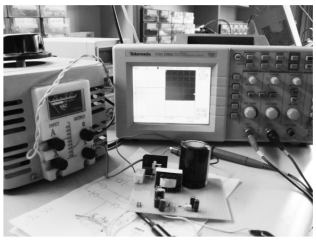


图3 实验对象

表1 实验变压器样机参数

变压器参数	电容容抗/Ω	励磁电抗/Ω	短路电抗/Ω	阻尼电阻/Ω
实验变压器	1.5	150	0.05	1.2

2.2 实验准备

2.2.1 有载分接开关的直流时间

为验证本文方法的有效性与实用性，对变压器有载分接开关的直流时间进行测试，其三相过度电阻、过度、切换以及不同步时间数据如表2所示。

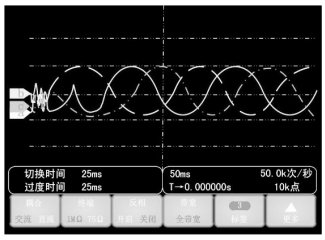
表2 有载分接开关直流数据参数

分析结果	a相	b相	c相
过度电阻/Ω	2.58	2.52	2.51
过度时间/ms	25	26	24.51
切换时间/ms	25	26	24.51
不同步时间/ms	0	-1.4	0.2

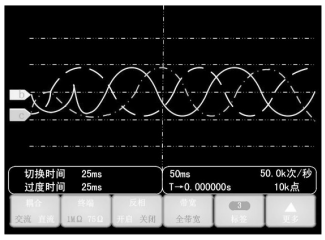
表2可知，三相直流数据参数基本相同并具有良好同期性，过度电阻、过度、切换时间分别约为25 Ω、25 ms、25 ms上下。一致性是三相交流波形所具备的特点，从表中可以看出，三相的不同步时间极小，一致性较好

2.2.2 有载分接开关吊芯检查

为确认有载分接开关的正常运行状态，需执行吊芯检查。图4的(a)、(b)分别展示了吊芯前后的交流图示。



(a) 吊芯检查前电流交流测试



(b) 吊芯检查后电流交流测试

图4 交流测试电流曲线

如图4所示，根据本文方法可知吊芯装置检查前电流交流曲线如图4(a)所示，三相电流交流波具备一致性，但部分电流交流波出现大振幅波动。吊芯装置检查后发现有载分接开关接触不良，更换损坏装置后，电流交流曲线如图4(b)所示，电流波形平稳，有载分接开关正常运行。

2.2.3 变压器漏抗选择

为验证本文方法的实用性，对变压器磁控开关进行漏抗选择。将变压器的两个电容器组的补偿容量按比例分配，会获得多倍单倍补偿容量，当单倍补偿为2倍以上时，调谐次数也会随之产生变换，其变换数据如表3所示。

表3 各补偿容量相对应调谐次数

单倍补偿倍数	调谐次数1 调谐次数1	调谐次数2	调谐次数3	调谐次数4
1倍单倍	6.97	6.9	6.8	6.7
2倍单倍	4.98	4.9	4.8	4.7
3倍单倍	4.1	3.9	3.8	3.7

由表3可知，当补偿容量为1倍单倍时，调谐次数接近6.9，会过滤电网的7次谐波；当补偿容量为2倍时，调谐次数接近4.9，会过滤电网5次谐波；当补偿容量为3倍时，调谐次数接近4，会过滤电网4次谐波，这样可以满足频繁投切作业，保证变压器装置的安全，对变压器进行合理的控制。

2.3 空载合闸实验

在空载合闸实验中，需要在装置合闸前闭合副开关接触器KMb，再闭合主开关接触器KMa，让装置保持带电状态，其电流波形如图5所示。

在合闸前期变压器存在短暂磁通现象，先设置好阻尼电阻，使铁芯处于未饱和状态，经过一个周期波，分支线路会达到平稳状态。由于变压器磁抗大，分支线路会

有小的空载电流，属于磁控开路状态，根据图5可知，空载电流线性度优，几乎不存在谐波。为验证本文方法的有效性，多次进行空载合闸实验，实际检测出的波形与图5相似，可知在空载状态下，有功消耗较小。

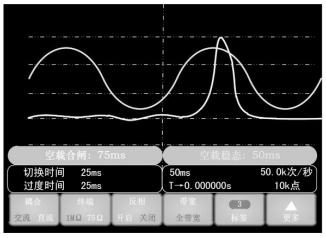


图5 空载合闸实验电流波形

2.4 投切实验

投切试验流程如下：在电流空载呈稳态状态时，开通变压器双向晶闸管，将副开关接触器KMb分闸切断阻尼电阻。阻断后旁支线路迅速进入补偿状态，延时不超过8 ms；会吸收少量有功，经过75 ms后，完全变成补偿状态后，用示波器记录如图6所示。

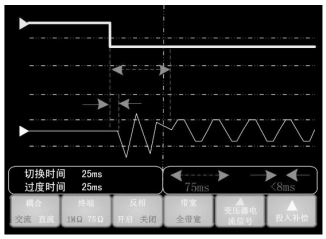


图6 变压器投入补偿实验电流波形

在实际应用中，KMb动作会产生延迟。当变压器晶闸管工作时，电阻切除也会有一定时间延迟，会继续与电容器关联一段时间。在此段时间内，旁支电路产生阻容性，会发出感性无功，吸纳少量有功功率；一段时间过后，KMb分闸到达，电阻切断，电流阻容性变成纯容性，变成无过度过程。

补偿退出流程如下：在稳定补偿状态下，首先闭合KMb以接入阻尼电阻，待130毫秒后触头完全闭合，随后，移除施加于变压器晶闸管的触发脉冲。随着电流逐渐衰减至零值，晶闸管将自然而然地进入关断状态，此时，旁路电路将无缝地转换至空载稳态。此转换过程中的电流波形变化，具体由图7所示。

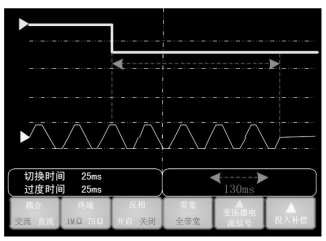


图7 变压器退出补偿实验电流波形

为确证本文方法的有效性，本实验多次执行了补偿退出试验，所得实验结果的实际波形与图7所示一致，均能在预定时间内顺利达到空载状态，有力验证了该方法对变压器控制的可靠性和效率。

3 结束语

本文提出了一种基于有载分接开关的变压器动作控制方法，该方法以磁控有载分接开关调控原理为基础，采用大容量无功补偿技术完成磁控开关智能控制；由变压器和开关组成“磁控开关”，可以通过双向晶闸管频繁投切，从而实现对变压器动作的控制。

另外，当变压器中的磁控有载分接开关发生故障时，需采用吊芯装置以检查分接开关内部的磁芯组件，从而完成变压器的维修工作。

目前动作变压器控制技术还需要日趋完善，将来会更好地服务于用电系统。

参考文献：

[1] 杜英，王超，杨杰，等.基于改进K−means聚类的变压器开关机械性能自动监测方法[J].制造业自动化，2022，44(6)：183−185，198.

[2] 曹宏.基于时频特征分析的变压器有载分接开关运行状态识别[J].高压电器，2020，56(4)：215−221.

[3] 郭贤珊，李凤祁，阮思烨，等.高压直流换流变压器有载分接开关控制优化[J].电力建设，2021，42(2)：9−19.

[4] 周尧，周松照，崔逸林，等.基于RFID无源标签的智能开关控制系统[J].计算机技术与发展，2020，30(6)：29−34.

[5] 闫施锦，陈淼，刘静波.基于OneNET的多模式远程控制开关系统设计[J].物联网技术，2022，12(2)：36−40.

[6] 赵智龙，范晓丹，张玉亮，等.基于深度学习的变压器有载分接开关状态监测研究[J].变压器，2022，59(1)：60−64，68.

[7] 刘君，余思伍，陈沛龙，等.基于聚类分析的变压器有载分接开关储能弹簧故障识别[J].高压电器，2020，56(7)：159−165，172.

[8] 曾全昊，王丰华，郑一鸣，等.基于卷积神经网络的变压器有载分接开关故障识别[J].电力系统自动化，2020，44(11)：144−151.

[9] 马勇，王同磊，吴鹏，等.换流变压器真空有载分接开关动力学模拟及工作一致性研究[J].高压电器，2022，58(7)：199−206.

[10] 张寿岩，史卫刚，杨利国，等.改进BiLSTM在电力变压器故障诊断中的应用研究[J].电测与仪表，2024，61(5)：160−165.

[11] 尹来宾，李勇，朱雷，等.空载合闸冲击条件下变压器绕组轻微松动预警[J].变压器，2022，59(8)：37−42.

[12] 赵斌财，林骞，于凯，等.基于神经网络的变压器故障声识别研究[J].自动化技术与应用，2023，42(7)：16−19.

作者简介：郑宇(1987-)，男，本科，工程师，研究方向：变压器运行与检修。