

# 补偿式可控变压器及其应用

苟振文<sup>1</sup> 李博文<sup>2</sup> 危文刚<sup>3</sup>

1. 宁夏冠能新材料科技有限公司 宁夏 石嘴山 753200
2. 广西能源集团武宣新能源有限公司 广西 来宾 546100
3. 武汉诺金信科技有限公司 湖北 武汉 430034

**摘要:** 补偿式可控变压器可控绕组和不可控绕组串联连接, 等效于变压器的一次绕组, 在一次绕组输入电压一定的情况下, 通过可控绕组的调节作用, 调节可控绕组的分压, 实现不可控绕组(等效于变压器的二次绕组)输出电压的调节。补偿式可控变压器二次电流较大, 可保证负载运行所需的大电流, 一次电流较小, 降低了注入电网的电流, 对电网冲击较小。补偿式可控变压器采用新颖的单相四柱铁芯, 采用铁芯局部饱和技术, 实现可控绕组的可控性和不可控绕组的不可控性。补偿式可控变压器在45MW电机软起动上的成功应用, 标志着其技术已经成熟, 推广前景广阔。

**关键词:** 补偿式; 可控变压器; 软起动; 及其应用

引言: 变压器制作参数固定, 在输入电压一定的情况下, 输出电压仅能通过有载调压的方式进行微调, 在电压调节范围较大的应用场合, 目前尚无成熟的解决方案。本文介绍了一种新颖的补偿式可控变压器, 可实现输出电压连续无极调节, 同时该变压器具有一二次电流补偿功能: 满足负载运行的二次电流较大, 注入电网的一次电流较小, 特别适用于超大功率电动机的软起动。目前, 该变压器已经在45000KW电动机软起动上运行已超过半年, 标志着该技术已经成熟, 具备大面积推广的条件。

## 1 补偿式可控变压器的特点

### 1.1 稳压精度高

补偿式可控变压器集成了尖端的传感器技术和智能控制算法, 如同一位精准的电压守护者, 时刻监测并精确调整输出电压。面对电网的微小波动或负载的瞬息万变, 它都能迅速感知并作出反应, 确保电压波动被严格控制预设的狭窄范围内。这种高精度稳压不仅是对技术极限的挑战, 更是对应用需求的深刻洞察。在精密制造、医疗仪器、航空航天等关键领域, 任何微小的电压波动都可能引发连锁反应, 影响设备性能乃至整个系统的稳定性。补偿式可控变压器以其卓越的稳压能力, 为这些领域提供了坚实的电力保障, 助力科技创新与产业升级。此外, 其高效的能源利用和环保特性也值得称道。通过精准控制电压输出, 减少了不必要的电能损耗, 符合现代社会对绿色、可持续发展的追求。

### 1.2 响应速度快

补偿式可控变压器以其惊人的响应速度, 在电力调

节领域里, 每秒的延迟都可能带来不可估量的损失。因此, 补偿式可控变压器内置了高速的检测与控制系统, 如同一位敏锐的哨兵, 时刻准备着应对电网中的任何细微波动。当电网电压出现波动或负载发生变化时, 补偿式可控变压器能够立即捕捉到这些信号, 并启动其独特的快速响应机制。该过程如同精密的机械舞蹈, 每个动作都经过精心设计和优化, 以确保在最短的时间内完成电压的调整和稳定。其响应速度之快, 几乎达到了即时的程度, 有效避免了因电压波动而导致的设备损坏、性能下降等问题。这种极致的响应速度, 不仅提升了电力系统的稳定性和可靠性, 更为各种高要求的电力应用场景提供了强有力的支持。无论是精密的科研实验、复杂的医疗手术, 还是瞬息万变的工业生产过程, 补偿式可控变压器都能以其卓越的性能和稳定的输出, 为这些领域提供坚实的电力保障<sup>[1]</sup>。

### 1.3 可靠性高

补偿式可控变压器在电力调节领域的卓越表现, 其根基在于其无可比拟的可靠性。这款设备不仅是技术的结晶, 更是对质量极致追求的体现。从设计到制造, 每个环节都经过精心策划与严格把控, 确保每台变压器都能经受住时间的考验。其核心部件均选用高品质材料, 经过严格筛选与测试, 确保在极端工况下仍能稳定运行。而智能控制系统的引入, 更是如虎添翼, 通过精密算法与高效执行机构的紧密配合, 实现了对变压器运行状态的实时监测与精准调控。该系统不仅能够及时发现并解决潜在问题, 还能在故障发生前进行预警, 大大降低了设备故障率。此外, 补偿式可控变压器即使在长时

间、高负荷的运行条件下，它也能保持出色的性能与可靠性，为用户提供稳定可靠的电力供应保障。这种高可靠性的设计，不仅赢得了用户的广泛赞誉，更为补偿式可控变压器在电力、通信、交通、工业控制等多个领域的广泛应用奠定了坚实的基础。

1.4 适用范围广

补偿式可控变压器以其广泛的适用范围，展现了其作为电力调节领域多面手的非凡能力。无论是科技前沿的计算机系统与精密仪器，对电压稳定性有着近乎苛刻的要求，还是工业领域的重型设备，在电流波动中寻求稳定的电力支持，补偿式可控变压器都能游刃有余地应对。其核心优势在于其灵活多变的调节能力，仿佛一位精通各种电力需求的魔术师，能够根据不同负载的特定需求，自动调整输出电压，确保每台设备都能获得恰到好处的电力滋养。这种智能化的调节机制，不仅提高了设备的运行效率，更延长了设备的使用寿命，为用户带来了显著的经济效益。此外，补偿式可控变压器还具备出色的环境适应性。面对电力系统中常见的电压波动、谐波干扰等不利因素，它能够通过内部结构的优化设计，有效抵御这些干扰，为设备提供一个稳定、纯净的电力环境。这种强大的抗干扰能力，使得补偿式可控变压器在复杂多变的电力环境中依然能够稳定运行，为各类设备提供可靠的电力保障。

1.5 维护简单

相对于其他调节设备，补偿式可控变压器的结构较为简单，维护方便。补偿式可控变压器之所以维护简单，主要基于以下几个方面：

1.5.1 结构设计：

模块化设计：补偿式可控变压器通常采用模块化设计，这使得各个组件易于更换和升级。如果某个模块出现故障，可以单独更换该模块，而不需要整体更换设备。

紧凑型设计：设备的设计紧凑，减少了占地面积，便于安装和维护。

2 原理与创新

见图1：交变电压 $U_e$ 加在变压器两端，可控绕组两端的电压为 $U_k$ ，不可控绕组两端的电压为 $U_d$ ，则 $U_e = U_k + U_d$ 。通过调整晶闸管的导通角 $\alpha$ ，改变可控绕组中直流控制电流 $i_K$ 的大小，调整可控绕组两端电压 $U_k$ 的大

小，从而调整变压器输出电压 $U_d$ 的大小<sup>[2]</sup>。补偿式可控变压器采用全新的原理，具有如下技术创新：

2.1 自励整流技术

可控绕组利用自身跨接的晶闸管整流产生直流控制电流 $i_K$ ，不需要外接大容量低压电源为晶闸管等功率组件供电。

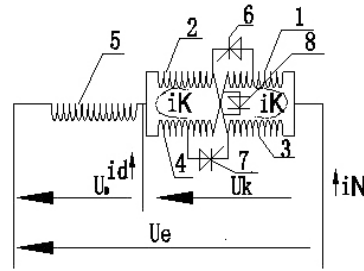


图1 单相补偿式变压器原理图

2.2 一二次电流补偿技术

根据变压器原理可知， $i_N = i_D * U_d / U_e$ ，可见，注入电网的一次电流 $i_N$ 小于给负载供电的二次电流 $i_D$ ，对于超大容量，需要调压的负载，可大大减小其运行电流对电网的冲击。

2.3 单相四柱铁芯及铁芯局部饱和技术

补偿式可控变压器采用新颖的单相四柱铁芯，可控绕组绕制在中间两个铁芯柱上，控制电流 $i_K$ 产生的直流磁通在中间两个铁芯柱及其之间的上下铁轭里闭合，形成铁芯的饱和区，铁芯的其他部分则为不饱和区，绕制在饱和区的绕组因直流磁通的作用，两端的电压是可调节的，绕制在不饱和区的绕制两端的电压则随之调节，如图2所示：

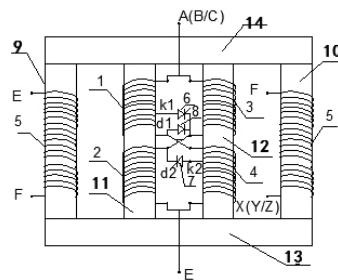


图2 单相补偿式可控变压器铁芯及绕线图

3 控制特性

在额定电压下，补偿式可控变压器输出电压 $U_d$ 和晶闸管导通角 $\alpha$ 之间的关系实测值如表1：

表1 晶闸管导通角 $\alpha$ 和变压器输出电压 $U_d$ 之间的关系

| 晶闸管触发角 $\alpha$ | $U_d$ 标么值 | 晶闸管触发角 $\alpha$ | $U_d$ 标么值 | 晶闸管触发角 $\alpha$ | $U_d$ 标么值 |
|-----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
| 0               | 0.5       | 60°             | 0.693     | 120°            | 0.937     |
| 10°             | 0.517     | 70°             | 0.735     | 130°            | 0.951     |
| 20°             | 0.602     | 80°             | 0.747     | 140°            | 0.972     |

续表:

| 晶闸管触发角 $\alpha$ | Ud标么值 | 晶闸管触发角 $\alpha$ | Ud标么值 | 晶闸管触发角 $\alpha$ | Ud标么值 |
|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|
| 30°             | 0.621 | 90°             | 0.795 | 150°            | 0.986 |
| 40°             | 0.643 | 100°            | 0.837 | 160°            | 0.992 |
| 50°             | 0.657 | 110°            | 0.892 | 180°            | 0.997 |

由表1可以看出,随着导通角 $\alpha$ 变大,注入可控绕组直流电流增大,补偿式可控变压器输出电压Ud变大,即随着注入可控绕组直流电流的变化,输出电压Ud随之变化,我们可以通过控制导通角 $\alpha$ 的大小,实现对补偿式可控变压器输出电压的连续平滑调节。

#### 4 典型应用

补偿式可控变压器可应用于电机软起动、电弧炉调压等技术领域。特大容量电动机,额定电流大,采用传统的软起动方式,起动电流一般控制在3倍左右,起动电流动辄几千安培甚至上万安培,起动电流直接注入供电电网,对电网的冲击很大<sup>[3]</sup>。为了避免电机起动带来的问题,在短期检修其他设备时,往往采取不停机让电机空转的策略来减少起动次数,这个空转带来了极大的电能浪费,也没有从根本上特大容量电动机起动的难题。利用补偿式可控变压器起动特大容量电动机,电动机可获得较大的定子电流,使得电动机的起动特性和传统软起动装置的特性差不多,但补偿式可控变压器一二次电流补偿功能,使得电动机的起动电流不直接注入电网,注入电网的是变压器的一次电流。这个电流远远小于电动机的起动电流,从而大大减少了对电网的冲击。

河北唐山某大型钢铁企业氧气厂空压机电机容量较大,电机额定参数如下:

$$P_e = 20800\text{kW}, U_e = 10\text{kV}, I_e = 1501.5\text{A}$$

前期利用水电组降压软起动,起动电流达5000A,近年因设备扩容电网负荷增大,经常因电压压降过大导致空压机起动失败的情况发生。2022年9月,该单位经技术改造,采用补偿式可控变压器软起动装置进行起动,起动时电机定子电流即变压器二次电流最大值为4510A(约3.0倍额定电流),网侧电流即变压器一次电流最大值2700A(约1.8倍额定电流),启动时间42S。补偿式可

控变压器软起动和水电组软起动相比,定子电流虽然有所降低,但差距不大,但水电阻起动定子电流直接注入了电网,而补偿式可控变压器软起动的定子电流是经过补偿后的一次电流注入电网的,注入电网的电流直接减少2300A,电网压降也保持在10%以下的正常水平,如图3所示:

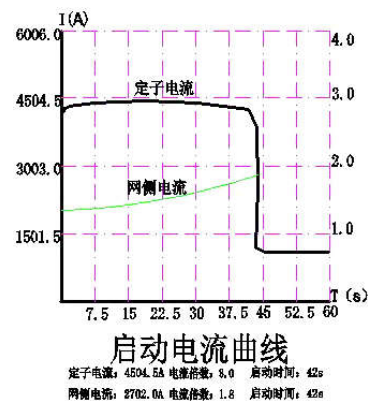


图3 启动电流曲线

#### 结束语

补偿式可控变压器采用单相四柱铁芯结构,三台这样的变压器组成一套三相变压器,因此硅钢片、线材等材料的消耗很大,成本较高,但其优良的控制特性,特别是一二次电流补偿功能,能解决特大容量电动机起动困难的技术痛点,仍然具有很高的推广价值。

#### 参考文献

- [1]谢毓城主编.电力变压器手册[M].机械工业出版社 2003.7
- [2]危佳仪等.补偿式可控变压器.国家发明专利[J], ZL2020 1 0946299.5
- [3]蔡宣三自励式可控饱和电抗器[M].清华大学