

电容取电与电压互感器协同供电策略的研究

杨世亮

摘要: 在电力系统持续发展的背景下, 电力设备智能化水平越来越高, 相应地对于电能质量的监控与控制要求越来越高。在现代电力系统中, 电压互感器 (Voltage Transformer, VT) 作为一种传统的电力设备, 主要用于测量高压输电线路的电压信号, 并提供电能质量监测所需的电力。但传统电压互感器因体积和重量较大, 功率消耗较多, 并且长时间工作可能会出现绝缘老化现象, 制约了该电压互感器在一些场景中的使用。为解决这一难题, 以电容取电为核心的低功耗电源技术在最近几年逐步成为人们关注的焦点。通过电容取电技术结合电压互感器, 能够实现电力设备更灵活、更有效地供电, 给电力系统智能化管理带来一种新的可能, 文章就此展开了探讨。

关键词: 电容取电; 电压互感器; 协同供电

引言

传统电力系统中电压互感器一般是由变压器把高压电转换成低压信号供计量装置及保护设备使用。但由于电压互感器本身功耗较大以及传统变压器体积、重量大, 应用场景有限。尤其对于需长期工作的小型设备或者分布式电力系统, 常规供电方式很难满足人们对低功耗不断提高的要求。因此研究新型供电策略来降低电压互感器功耗, 提高电压互感器运行效率及可靠性已成为电力工程领域中的一项重要任务。

一、电容取电与电压互感器概述

1. 电容取电的基本原理

电容取电的基本原理基于电容器在交变电场中的充放电过程, 通过获取电场能量转换为电能供电使用。电容器的基本工作公式为 $Q=C \times V$, 其中 Q 是电荷量, C 是电容值, V 是两端电压。在交流电力系统中, 由于电压 $V(t) = V_m \sin(\omega t)$ 随时间周期性变化, 电容器两端会产生周期性的充放电行为。当电容器与电力系统耦合时, 电容器通过该交变电场获取能量, 转化为直流电供给电路中的低功耗设备。电容器存储的能量可以表示为 $W = \frac{1}{2} CV^2$, 这个公式表明电容器的存储能量与其电容值及施加的电压平方成正比。为了有效获取电能, 通常选用耐高压的电容器, 并通过整流电路将交流电转化为

稳定的直流电。整流过程中的滤波电路设计对于输出电压的平稳性至关重要。电容值的选择一般根据所需的功率 P 和工作频率 f 确定, 满足 $P = \omega CV_m^2$, 这里 V_m 为最大电压。为提高取电效率, 系统可能会采用电荷泵电路或倍压整流电路, 这些电路结构能够提升输出电压, 并在小电容条件下提供较大的电能输出。在实际应用中, 还需要考虑电容器的体积、耐压性能、温度系数等参数, 以确保取电装置的可靠性和稳定。

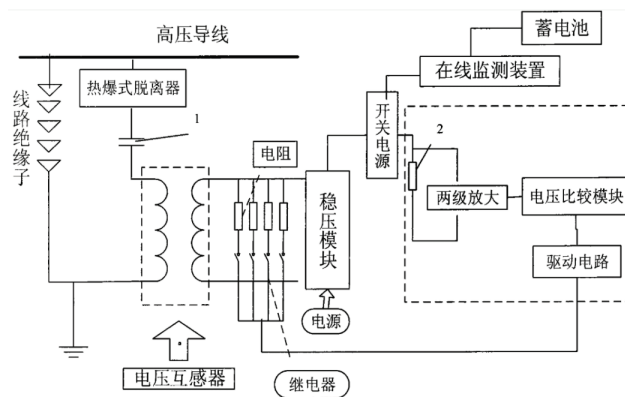


图1 一种高压电容降压取电装置示意

2. 电压互感器的供电原理

电压互感器 (VT) 的供电原理依赖于电磁感应, 通过在高压线路与低压测量设备之间构建一个安全可靠的电压变换通道。其基本原理是利用变压器的磁耦合特性, 将一次侧 (高压侧) 的高电压转换为二次侧 (低压侧) 的小电压, 保持电压和电流的比值恒定。根据法拉第电磁感应定律, 互感器一次侧绕组中的交流电压 V_1 产生交变磁通量 $\phi(t)$, 这个磁通量在铁芯中产生交变磁

作者简介: 杨世亮 (1988.5——) 男, 汉族, 硕士研究生, 中级工程师, 主要从事配电网一二次融合产品技术研究。

场，并在线圈中感应出电动势。二次侧绕组通过耦合磁通量产生感应电压 V_2 ，其值根据匝数比 $\frac{N_2}{N_1}$ 与一次侧电压相关，公式为 $V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1$ 。电压互感器设计时，铁芯材料的磁导率和饱和特性至关重要，这直接影响磁通量的稳定性和线性度。此外，为了确保测量精度，互感器的励磁电流和负载效应需要严格控制，以降低磁滞损耗和铜损。二次侧负载通常为高阻抗设备，以减少电流负载对互感器的影响，从而提供稳定的电压输出供给测量仪器或保护装置。这种供电机制有效保障了电力系统高压测量的安全性和准确性，同时通过精密设计减少了能量损耗。

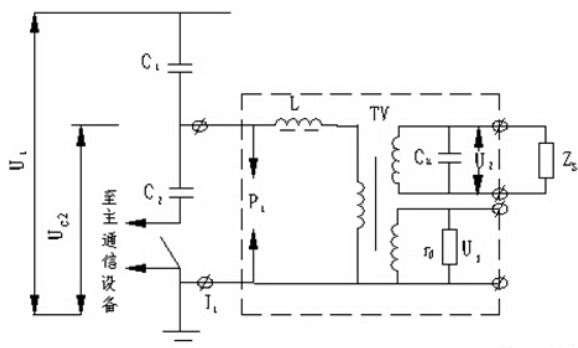


图2 电容式电压互感器分压原理

3. 协同供电的工作机制

协同供电工作机制是电容取电技术和电压互感器结合在一起，目的是实现电力系统高效稳定地供能。电压互感器利用电磁感应使高压线路上的电压降低到适于测量与供电的低压范围内，从而为相关装置提供基本电力支持。电容取电技术的工作原理是从电场中提取能量并将其储存在电容器中，然后将其转换为直流电流，以补充电压互感器的电力不足或在某些特定情况下提供独立供电。二者协同表现为电压互感器为基础电源提供连续供电，电容取电装置则可在负载变化或者电压波动情况下快速响应，提供附加电力支持以提高整个系统运行稳定性与可靠性。经过精密电路设计，二者在供电时形成互补关系，电压互感器低频供能和电容取电高频瞬时供能协同作用，该系统不仅可以满足长时间的稳定电力需求，还具备处理瞬时负载波动的能力。为实现该协同机制，该系统需要有一种有效的能量管理和切换控制策略，该控制策略通过对电压、负载和其他参数进行检测来动态地调节二者供电比例，保证了整个系统能够在多种运行环境下高效、平稳的工作。该协同供电机制在增强供

电安全性与灵活性的同时，也大大扩展电力设备在各种场景中的适用范围。

二、协同供电策略

在对某220kV变电站继电保护系统进行设计时，充分考虑了该站地理位置偏僻，位于易遭雷击高海拔地区，单一供电方式很难确保继电保护装置长时间稳定工作。为此，工程师们决定采用电容取电与电压互感器协同供电的策略，以增强系统的可靠性和安全性。

1. 电容取电系统设计

本变电站电容取电设备经耦合电容器取自220kV高压线路。所选耦合电容器的参数是50nF，额定电压是220kV，电容器的两端连接有限流电阻及电压调节装置来确保输出电压稳定。鉴于该变电站的高压电路具有较高的雷击频率，为了避免电容器因过高电压而损坏，系统还加入了瞬态电压抑制器（TVS），它的阈值定为350kV，以保证雷击过程中的瞬时过电压能被有效地抑制。正常工作时电容取电系统可供电20W左右，足够小功率继电保护装置基本工作需要。同时电容取电系统冗余设计确保电压互感器发生故障或者检修时需紧急供电。

2. 电压互感器供电系统设计

为了确保主要供电系统的稳定运行，该变电站安装了一套标准的220kV/100V电压互感器，其额定功率达到100VA，能够为多个继电保护装置和自动化设备提供持续稳定的电源供应。这款电压互感器是通过三相接线技术与主电网进行连接的，这样做是为了确保即使在一相出现故障的情况下，其余两相依然能够保持系统的稳定运行。

考虑到可能的短时电压波动和突发情况（如切换负荷或者突发故障引起瞬时电压跌落等），在电压互感器的低压侧还配置了一套电能质量调节装置，包含自动电压调节器（AVR）和不间断电源（UPS）。在这其中，AVR被设定为±10%的额定电压范围，以确保即使在电压发生波动的情况下也能维持稳定的电源输出。与此同时，UPS系统则在主电源出现故障的情况下，能够提供长达10分钟的紧急电源供应。

3. 协同供电系统的控制逻辑

在该变电站的协同供电设计中，电容取电系统与电压互感器供电系统的切换由一个专用的智能切换控制器来管理。控制器的主要逻辑如下：

（1）优先供电模式：在正常情况下，电压互感器提供主要供电，电容取电系统处于待机状态。控制器实时监

测电压互感器的输出电压和电能质量参数（如电压波动、谐波含量等），确保在供电质量下降时能够迅速响应。

（2）切换条件设定：当检测到电压互感器输出电压下降超过5%或出现瞬时中断时，控制器立即启动电容取电系统，并在100ms内完成供电切换。切换过程中，控制器会根据负载的瞬时功率需求调整电容取电系统的输出，以保证继电保护装置的正常运行。

（3）冗余模式运行：如果电压互感器出现持续故障（如二次侧短路或一次侧接地），控制器会自动进入冗余供电模式，由电容取电系统独立供电。同时，控制器会发出告警信号，通知维护人员进行故障排查和修复。

（4）恢复正常模式：在电压互感器故障排除后，控制器会在负载电流回稳后3秒内将供电切换回电压互感器，电容取电系统重新进入待机状态。切换过程中，控制器会确保电压和频率的同步，以避免切换时引发电力波动。

4. 协同供电策略的优势分析

通过这种协同供电策略的实施，变电站继电保护系统的供电可靠性得到了显著提升。具体体现在以下几个方面：

（1）高可靠性：两种供电方式的结合降低了单一电源故障对系统稳定性的影响。尤其是在雷击频繁的高海拔地区，电容取电系统的备用作用尤为重要。

（2）智能化控制：通过智能切换控制器，实现了供电系统的自动化管理，确保在不同工况下均能提供最佳的供电方案。切换时间短，保证了设备的连续运行。

（3）灵活性与可扩展性：协同供电系统具有良好的扩展性，可根据实际需求调整电容取电设备的容量或增加电压互感器的配置，满足不同规模和需求的电力系统应用。

（4）成本效益：虽然协同供电策略在初期投资上可能略高于单一供电方式，但其长期运行的稳定性和减少的维护成本使得总体经济性更加突出。

结束语

由上可知，电容取电与电压互感器协同供电策略在实际应用中表现出极大的优势，尤其适用于那些对供电连续性和稳定性要求较高的电力系统场景。未来，随着电力系统智能化水平的提升，协同供电策略将在更多领域得到推广和应用。

参考文献

- [1] 马榕嵘. 基于精益管理的电容式电压互感器试验改善研究[D]. 华南理工大学, 2022.
- [2] 李宾宾, 罗沙, 黄杰, 等. 典型因素耦合影响下电容式电压互感器频率特性分析与仿真研究[J]. 电工技术, 2023(7): 60-63.
- [3] 王闯. 一种电容式电压互感器取电电路: CN202222545079.9[P]. CN218868115U[2024-08-09].
- [4] 赵贤. 基于二次电压波动特征的电容式电压互感器在线监测方法研究[D]. 华南理工大学, 2023.
- [5] 李瑞. 牵引变电所电容式电压互感器检测方法的研究[J]. 湖南工业职业技术学院学报, 2022(003): 022.
- [6] 周文, 梁纪峰, 焦亚东, 等. 电容式电压互感器电压暂降测量误差分析及校正[J]. 中国电力, 2022, 55(7): 10.
- [7] 陈一惊, 刘坤雄, 冯雅琳, 孙立文, 张小庆, 刘军成. 电容式电压互感器谐波监测技术综述[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(5): 70-75. DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2022.05.011.