

# 变电设计中无功补偿装置的设计分析

## Design and Analysis of Reactive Power Compensation Device in Substation Design

许笛

Di Xu

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

**摘要:** 论文以无功补偿装置设计作为切入点,分析变电工程中常用无功补偿装置的工作原理、设计方法,分析无功补偿装置存在的设计问题,针对性提出优化设计措施。旨在发挥无功补偿装置功能,提高供电质量与供电稳定性,满足变电系统的运行需要。

**Abstract:** This paper takes the design of reactive power compensation devices as a starting point, analyzes the working principles and design methods of commonly used reactive power compensation devices in substation engineering, analyzes the design problems of reactive power compensation devices, and proposes targeted optimization design measures. The purpose is to give full play to the functions of reactive power compensation devices, improve power supply quality and stability, and meet the operational needs of the substation system.

**关键词:** 变电设计; 无功补偿装置; 设计方法

**Keywords:** substation design; reactive power compensation device; design method

**DOI:** 10.12346/edwch.v1i2.7836

## 1 引言

无功补偿装置作为变电系统的重要组成部分,在系统运行期间提供无功补偿,将功率因数维持在合理范围内,这对减少电力损耗、改善供电效果、降低供电成本有重要的意义。然而,当前在部分变电工程中,由于设计方法落后、设计理念保守,无功补偿装置的实际应用效果并不理想,远未达到预期要求,存在装置利用率低、电压波动大、网损率高等问题。为此,应创新优化无功补偿装置设计体系的,有效提高电力系统运行的稳定性能。

## 2 变电设计中的无功补偿装置设计方法

### 2.1 调相机设计

调相机也被称为同步调相机,本质上属于一种特殊运行状态下的同步电机,是早期变电工程最为常见的无功补偿装置。在系统电压下降时,调相机处于过励状态,持续汲取相位超前电压电流,凭借励磁作用,向系统提供更多的无功输

出功率,从而改善功率因数。而在电压上升时,调相机切换为欠励磁运行状态,系统把感性功率传输给调相机装置,重点发挥无功负荷效果。简单来讲,调相机装置可以根据系统负载情况来实时调节励磁电流、改变无功补偿状态。根据实际应用情况来看,调相机有着跟踪速度快、故障率低、单机容量大的优势,但也存在有功损耗大、运行维护复杂的局限性,有功损耗普遍在 1.6%~5.4% 不等。

在调相机设计环节,重点掌握补偿容量计算、调相机选型、用电条件、冷却四方面的设计要点。第一,在补偿容量计算方面,根据变电系统复合功率来判断调相机补偿容量,率先按照额定电压来计算系统功率损耗,获取变电电压、变压器分接头电压、变压器变比等数据,再把各项数据导入公式内求解补偿容量值。第二,在调相机选型方面,当前主要配备三相式、隐极机式或是自并励磁静止励磁同步调相机,以 SFC 静止变频器作为起动方式,调相机由零至额定转速时间不得超过 300s,并要求调相机额定容量略大于实际补

【作者简介】许笛(1990-),男,中国江苏如东人,本科,工程师,从事电气研究。

偿需求,以此来满足变电系统升级改造需要。第三,在用电条件方面,根据工程情况判断是否满足调相机用电需求,如果原有开关柜备用间隔无法满足实际需要,则把调相机两路电源分别引接在变电系统高压站用变低压侧。第四,在冷却方面,考虑到调相机运行期间持续产生大量热量,容易出现超温故障,应采取内部冷却、外部冷却措施。内部冷却是采取双水内冷方法,在定子/转子绕组部位利用水体冷却。外部冷却是在调相机外部搭建机力通风冷却塔,通过空气流动持续把热量带出冷却塔<sup>[1]</sup>。

## 2.2 电容器设计

电容器由两个导体和不带电绝缘介质组成,导体保持相互靠近状态,由绝缘介质相互隔离导体。在变电系统中,电容器采取并联安装方式,持续向系统吸收或是输出容性功率,向感性线路提供无功补偿,起到增强系统负载能力、调节功率因数的作用。根据应用情况来看,电容器有着成本低廉、结构简单、易于安装维护的优势,在已建成变电工程中,并联电容器负责实现90%以上的无功补偿容量。

在电容器设计环节,重点掌握电容器选型、电气接线、晶闸管投切三方面的设计要点。第一,电容器选型。根据变电系统情况与无功补偿需求来挑选最佳类型的电容器,如在高频旁路内安装瓷介电容器,在补偿容量较小与介电损耗要求严格时安装自愈式并联电容器,在低频电路内安装金属化聚丙烯电容器,安装陶瓷电容器作为回路电容器。第二,电气接线。如果选择安装高压并联电容器装置,通过分组回路接入母线,再通过总回路接入变压器,也可设置专用母线接入。而在安装电容器组时,则采取先并联后串联方式,提前把组内各相或是桥臂进行并联,再由多台电容器串联成组,最终采取单星形接线方式。第三,晶闸管投切。由晶闸管替代接触器作为投切装置,晶闸管开关具备过零投切功能,投切期间不会形成合闸涌流<sup>[2]</sup>。

## 2.3 静止无功补偿器设计

静止无功补偿器凭借高频开关装置来实现无功补偿,实际补偿效果明显由于凭借电感器产生无功功率的传统补偿装置,在中高压电力系统与变电系统内用于动态无功补偿。此类装置由可控电抗器、电力电容器并联组成,电抗器负责持续吸收感性无功功率,电容器负责持续发出容性无功功率,通过控制电抗器使静止无功补偿器由发出功率状态平滑切换为吸收功率状态。

在静止无功补偿器设计环节,重点掌握装置选型、控制方式、继电保护三方面的设计要点。第一,装置选型。变电站内主要选用TCR晶闸管相控电抗、TCS晶闸管投切电抗两种类型装置。其中,TCR装置由高阻抗变压器、调节器、晶闸管阀以及电容器组成,把超前无功功率作为固定值,根据系统无功功率变化情况来实时调节固定值,始终把系统供给的无功功率保持在常数,从而限制电压闪变。TCS装置由降压变压器、晶闸管阀、调节器与电容器组构成,根据负

载感性无功功率变化情况来投切电容器,控制电容器在极短电流值内切换。第二,控制方式。可采取电压控制、恒导纳控制两种方式。电压控制是把电压信号作为控制变量,根据变电系统电压信号来分析电流变化特性,绘制端电压与电流关系曲线,再确定装置运行方案。恒导纳控制是提前根据系统情况来设定参考导纳,有操作人员手动控制静止无功补偿器投切状态,无功输出值为参考导纳和电压平方二者乘积。第三,继电保护。加装继电保护装置,向静止无功补偿器提供包括过压保护、缺相保护、短路保护、谐波保护在内的多项保护功能,如在系统电压超过高压保护值时执行过压保护动作<sup>[3]</sup>。

## 2.4 静止同步补偿器设计

静止同步补偿器由桥式变流器、集换流晶闸管等元件组成,在运行期间,持续把变电系统交流电通过变流器来转换为直流电,输送至直流侧储能器内,再把直流侧电压电流通过变流器来转换为交流电压电流,输送至系统当中,并通过改变基波无功电流大小与相位来实现无功补偿功能。根据应用情况来看,静止同步补偿器有着可靠性强、调节速度快、运行范围宽、体积小的优势,既可以满足变电系统无功补偿需要,还可以应用于动态电压控制、功率振荡阻尼、暂态稳定控制等其他场景。

在静止同步补偿器设计环节,把控制方式作为设计重点,正常情况下,采取直接电流控制、间接电流控制、多电平逆变器控制三种方式。第一,直接电流控制。在变电系统内加装PWM跟踪控制器,控制器持续采集系统电流信号,根据电流波形瞬时值分析结果来下达控制指令,投入或切除静止同步补偿器,此项方法适用于控制中小容量的静止同步补偿器。第二,间接电流控制。持续采集静止同步补偿器中逆变器的交流电压基波相位、振幅信号,按照信号分析结果来间接控制交流侧电流。此项控制方法适用于安装大容量静置同步补偿器的变电系统。第三,多电平逆变器控制。利用多载波或是多带宽PWM装置来控制静止同步补偿器,具体可采取消除谐波PWM、三角形载波相开频率最优PWM等技术手段。

## 3 变电设计中的无功补偿装置优化设计措施

### 3.1 无功功率需求分析

在变电系统中,电力变压器、输电线路、异步电动机等供用电设备都存在无功补偿需要,设计人员应根据所掌握工程信息,逐项计算各台供用电设备的无功功率需求,再把计算结果进行汇总整理,从而获取系统总体无功功率需求,将其作为无功补偿装置的容量选择依据。第一,对于电力变压器,无功功率需求由励磁所需、绕组漏抗消耗两部分组成,在计算公式内导入空载电流百分值、变压器额定容量来求解励磁所需无功功率;公式内导入变压器短路电压百分值、额定电压、有功及无功功率、绕组电抗等参数来求解绕组漏抗

消耗值。第二,对于输电线路,在计算公式内导入电抗、电纳、线路送端与受端电压值来求解无功功率需求量,线路输送功率超过自然功率时产生容性无功功率需求,线路输送功率不足自然功率时产生感性无功功率需求,在输送功率、自然功率二者保持平衡状态时不产生无功功率需求。第三,对于异步电动机,根据电动机负荷占比、自然功率因数和变电系统高峰负荷来计算无功功率需求量,并根据工程情况来确定功率因数补偿目标,正常情况下,无功补偿目标为0.9或0.95功率因数。

此外,在无功补偿装置容量设计环节,要求装置容量略大于无功功率需求,确保变电系统后续在扩大规模、增加供用电设备台数后,仍能把功率因数维持在0.9及以上。同时,设计人员还应注重避免防止过度补偿,如果装置容量远超过实际补偿需求,则会在线性磁场作用下产生过大磁场电压,进而损坏变电系统设备。

### 3.2 无功补偿装置比选

为取得理想无功补偿效果,设计人员必须全面掌握各类型装置的功能特性、适用范围,选择符合变电工程实际需要的无功补偿装置。第一,调相机,具有响应速度慢、调节平滑连续、控制方法简单、基本不受系统电压影响、无谐波电流、分相调节有限的功能特性,适用于枢纽变电站、受端变电站以及换流站等变电工程,将其作为大容量集中补偿装置,正常情况下的装置容量超过10MVA。第二,并联电容器有着响应速度慢、调节平滑不连续、易于控制、受系统电压明显影响、无谐波电流、无分相调节的功能特性,适用于中小容量的变电站工程,把机械开关作为开关投切装置,或是采取全新的晶闸管投切方式。第三,静止无功补偿器,具有响应速度快、调节平滑连续、控制方式复杂、明显受系统电压影响、产生较大谐波电流、具备分相调节能力的功能特性,适用于电压等级超过35kV的变电系统。第四,静止同步补偿器,具有响应速度极快、调节平滑连续、控制方式复杂、基本不受系统电压影响、产生较小谐波电流、具备分相调节条件的功能特性,当前仅在少数大型变电工程中得到规模应用,除无功补偿外,还可用于潮流控制等其他场景。

### 3.3 谐波抑制

在选用并联电容器组作为无功补偿装置的情况下,通过配置串联电抗器,起到限制电容器投入瞬间涌流、抑制谐波电流放大的效果。但根据实际情况来看,受到电抗率选择不当等因素影响,电容器组投入运行期间有较高可能形成并联或是串联状态的谐振回路,在回路作用下放大谐波电流,进而威胁到变电系统运行安全。对此,为抑制谐波问题,预防电容器组出现漏油、爆炸等安全事故。设计人员需要从电容器组串联电抗率配置、电阻抗选配两方面着手,采取优化设计措施。第一,在串联电抗率配置方面,在长期负荷性质稳定且谐波污染较小的变电系统内,配备电抗率不足1%的阻尼式限流器,或是安装串联电抗器;在预期负荷出现3次

以上较大谐波现象的变电系统,把单组电容器电抗率设定为12%,在谐波特性难以控制时则搭配设置5%与12%的电容器组;在预期负荷出现3次以内谐波较小现象的变电系统,把电容器组电抗率设定为5%。第二,在电阻抗选配方面,在完成初步设计工作后,在设计方案基础上开展仿真实验,重点检查电容器组在有、无串联电抗器情况下的特征谐波减小效果,并把电容器组安装部位母线电压作为检测点。例如,在实验期间的测点谐波超过5次,绝大多数谐波污染较小时,把串联电抗器的电抗率设定为5%~6%即可。而在实验期间测点出现3次及更多次数重大谐波污染现象时,则在全部或是绝大多数电容器组中安装12%串联电抗器,这虽然会产生高昂成本,但却可以显著改善谐波抑制效果,并在串联电抗器中留有足够的安全裕度。

### 3.4 处理无功补偿装置运行缺陷

在无功补偿装置投运使用期间,受到现场环境、装置老化、变电系统运行波动等因素影响,偶尔出现各类故障问题,无法稳定向系统提供无功补偿。因此,为改善无功补偿效果,设计人员需要深入了解各类型补偿装置的典型运行缺陷,找准问题症结,在设计方案中采取相应处理措施。

以常用的并联电容器为例,运行缺陷包括电抗器本体发热、电容器发热。第一,电抗器本体发热是由于温升设计裕度偏小、接线端子焊接质量不佳、绝缘材料老化严重,使得电抗器在经过电流时产生较大有功损耗与热量。需要在方案中增加温升设计裕度、延长绝缘材料使用寿命、提高绝缘耐热等级。如果电抗器户外安装,还应加装防雨罩。第二,电容器发热是由于电容器长时间处于过负荷运行状态,介质损耗和运行电压呈正比,运行电压越高,则介质损耗越大、电容器发热越严重。需要在设计方案中采取设定工频过电压最长持续运行时间、负荷低谷时段切除电容器组、准确计算电容器额定电压值、加装可调节变压器调压开关等优化措施。

## 4 结语

综上所述,为保障变电系统在复杂环境条件下始终保持平稳运行状态,通过调节功率因数来减少线损量、延长供用电设备实际使用寿命。电力企业必须认识到无功补偿装置在变电系统中占据的重要地位,设计人员要根据具体要求,创新设计方法,积极落实无功功率需求分析、装置比选、谐波抑制、装置运行缺陷处理等优化设计措施,满足变电工程发展需要。

### 参考文献

- [1] 聂宁.变电设计中无功补偿装置的设计方式探析[J].通讯世界,2015,264(5):124-125.
- [2] 杨琳.变电设计中无功补偿装置的设计方式探析[J].通讯世界,2014,250(15):118-119.
- [3] 李鹏云,张帆.变电一次设计中无功补偿设计分析[J].电子世界,2016,501(15):137.