

无功补偿技术在风电场电气一次部分运用研究

邹泽起 杨曼 黄尔训

湖北省电力规划设计研究院有限公司

摘要:近年来,我国更加重视环境问题,积极探索新能源技术在资源循环利用中的应用。在各类能源中,风能属于可持续清洁能源,具有巨大的应用潜力,因此,我国持续探索风电场的新能源发电技术。在风电场电气系统建设过程中,相关人员应重视风电场电气一次设计,并研究无功补偿技术在其中的运用情况,不断提高风力发电水平,实现可持续发展。

关键词:无功补偿技术;无功电压控制系统;补偿器;参数设计

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.19.071

前言:风能是我国重要的清洁能源之一,但在实际开发风能的过程中,风力发电场容易受到外界环境影响出现发电不稳的情况,影响电力的平稳供应。因此,在风力发电过程中,应重视无功补偿技术的应用,调整电压控制系统架构,为风电场顺利并网提供有力支撑。

一、风电场无功补偿特点与技术优化措施

(一) 风电场无功补偿技术特点

风电场内电气一次部分系统组成相对复杂,包括变压器、风力发电机、变电站等,想要增强电网中无功损耗控制效果,应加强对无功补偿设备特点的分析。第一,当前风电场电气系统运行过程中主要补偿感性无功功率,一般借助容性无功设备实现,该设备可以有效控制有功功耗与无功功耗之间的比例。第二,风力发电机组具有一定的不确定性,当外界风速发生变化后,其功率也会受到一定影响,因此在使用无功补偿技术以及相应装置时应重点关注电压波动量的控制,将其维持在稳定范围内。第三,在无功补偿装置的使用上,应重点关注无功功率损耗控制上,减少线路以及变压器的无功传输。一般情况下,应将电网系统中的无功损耗控制在4%左右。此外,电缆对电力系统的无功功率因数也有一定的影响,在提高风电场电力系统供电稳定性的前提下,应补偿相应的无功损失。

(二) 优化措施

1. 无功补偿配合方法与优化

想要提升风电场电气一次部分系统无功补偿技术的应用效果,应尝试调整无功技术应用方式,以无功补偿配合的形式,控制无功损耗。常用的无功补偿配合方法如下:(1)多组静态无功补偿。该方法相对简单,但应用时需加强对缺少补偿的无功功率风电场出口情况的检测。(2)计算无功功率数值平均值,增强对无功补偿技术应用效果的控制。相关人员应定期记录无功功率数值,同时保证数值的准确性。(3)重视静态无功补偿技术下的无功功率控制。(4)确定风电场内无功补偿容量,可以根据参考装置的运行情况计算无功功率平均值。(5)根据所得数据和无功补偿装置的应用效果,进一步检测无功补偿技术应用后风电场出口处的无

功损耗。进一步实现风电场运行效率的无功优化,可分为两大部分,一方面为无功补偿装置的优化控制,另一方面为电压系统的优化控制。

2. 无功补偿与风电场并网

在风电场电气一次部分设计中引入无功补偿技术,应对风电场并网时容易出现的问题进行分析,以增强无功补偿技术的应用效果。通常情况下,风电场并网时,异步发电机容易出现输送短路电流的情况,直接干扰设备的运行,此外还存在电网稳定性差、造成谐波等问题。应及时调整无功补偿技术和相应装置,增强电网的稳定性。想要保证发电设备的稳定运行,风电场还可以在站内安装超导储能系统,搭配相应的无功补偿装置,增强对电力储能的控制能力,实现动态的无功功率调节,下图1为某超导储能无功双馈发电系统示意图。在日常工作中,应加强对电网运行情况的控制,合理设计无功补偿量,控制出口处电压的稳定性,实现动态电压控制。

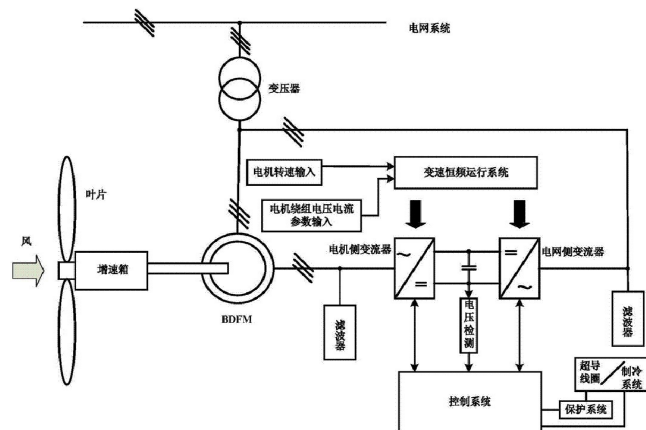


图1 某超导储能无功双馈发电系统示意图

3. 故障应对策略

在风电场电气一次部分应用无功补偿技术,应提前做好故障应对策略,用于预防可能出现的意外。在日常工作中,技术人员应通过智能化的控制策略,借助先进技术预测分析电气系统内可能出现的变化,提前调整无功补偿设备,最大限度的减少无功损耗。还可以配置与无功补偿装置功能相近的备用设备,当主设备发生故障时,可以迅速接入备用设备保证电网正常运转。技术人员可以利用无功补偿设备内的自动切换功能,实现主设备状态的实时监测,当发现主设备故障时,可以依据切换功能内的故障检测算法和切换逻辑及时更换设备,降低对系统的影响。此外,应制定完善的无功补偿装置维护计划,定期检查并维护,减少故障问题的产生,增强风电场电气一次部分的运行稳定性。

二、风电场电气一次部分的无功补偿技术应用

(一) 常规补偿技术

1. 同步调相机

风力发电电力系统运转的核心设备为变压器和异步电动机，上述设备在运行过程中需要吸收电网内大量的无功功率，直接导致电力系统内的功率因数降低。使用同步调相机可以有效应对该问题，该设备在运行时可以吸收电网内的超前电流，从而改善电网功率因数。从整体上而言，同步调相机在控制电压上具有良好的效果，能实现无功功率的动态控制，若供电系统内出现短时电压升高的情况，还能吸收无功功率。但该设备也存在一定缺陷，一是同步调相机为旋转机械，工作过程中产生的有功损耗较大，二是响应速度相对较慢，运维成本高，目前在风电场中逐渐减少使用。

2. 固定切头电容器

该设备一般设置在每个出风口处，用于补偿异步发电机消耗的无功功率，将其安装在主变压器一侧也可以实现全程变压器和集电线路所消耗的无功功率控制。电容器内部结构相对简单，成本较低，且运行稳定性强。其工作原理为借助机械切头的分接头转换提升电压的稳定性，进而扩大输电线路的容量，达到控制系统内电流的目的^[2]。但当前我国的风力发电机组容量和风电场规模都在逐渐扩大，电容器工作过程中容易出现反应速度慢、动态性差的情况，并且其容易受到环境影响出现谐振、合闸涌流等问题，进一步影响了工作效果。

3. 静止无功补偿装置

该技术较为先进，具有连续控制功率的能力，还能通过发出或吸收无功功率控制节点电压，实现动态补偿。当前该装置在电力系统、风力发电等行业中都有广泛使用，能为风力发电机组提供可靠性高、稳定性强的无功补偿和谐波滤波解决方案。具体而言，静止无功补偿装置包含三部分，分别为固定电容器组、可调电抗器以及控制系统，下图2为该装置工作原理图。其中固定电容器组在基波的辅助下能为电力系统提供容性无功功率；可调节电抗器则能为电网提供感性无功功率。在电力系统运行过程中，感性无功功率能以跟随的形式调整电网内的无功功率，使其趋近一定值或趋向0。

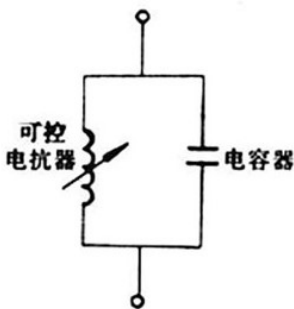


图2 静止无功补偿装置工作原理图

4. 静止同步补偿器

该技术应用时，应将装置并联在电网上，可以为电力系统额外增加一个动态无功电流源，其产生的无功电流能与负荷无功电流一同变化，并自动补偿系统所需的无功功率。该装置内包含可控制的大功率电子元件，借助电抗器并联到电网中。使用时只需调节电路输出的

电压幅值和相位即可，即能完成动态无功补偿。下图3为该设备的电路原理图。静止同步补偿器具有极强的动态性，能连续、平滑地为电网提供无功功率补偿，也不会造成谐振、谐波放大等问题，整体的安全性和稳定性高。

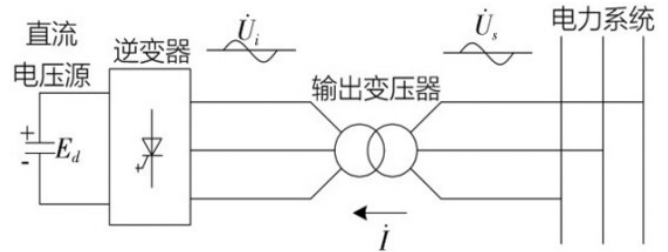


图3 静止同步补偿器电路原理图

(二) 无功补偿技术对比分析

传统无功补偿技术主要为上节所提四类，每一类技术均有各自优缺点，将无功补偿技术应用于风电场电气一次部分设计过程中，应加强各类技术的对比分析，选择符合风电场实际需求的无功补偿技术。

以直流系统内四种无功补偿技术应用效果的对比为例。在直流系统中无功补偿技术主要承担电压、直流故障恢复功能。可以从分析交流电路近端三相故障、单相故障两种情况下的无功补偿技术应用效果完成技术对比。其中在交流电路近端三相故障中，同步调相机设备完成直流恢复的时间最短，为0.48s，其次是静止同步补偿器、静止无功补偿装置和电容器。在单相故障恢复中，以同步调相机、静止同步补偿器应用效果最好，电容器基本完成恢复工作，但直流换相失败，静止无功补偿装置恢复时间过长，并且没有完成直流换相。从整体上看，同步调相机、静止同步补偿器在直流系统故障中的应用效果较好，若是风电场电网具备特高压受端特点，应采用上述两种设备，减少故障问题。在此基础上，进一步对比同步调相机、静止同步补偿器的应用效果，可以选择以下标准如响应速度、动态特性、电压支撑能力等等^[3]。

(三) 无功电压控制系统设计

1. 系统架构

风电场在运营过程中，对外界环境稳定依赖较大，在电气一次部分无功补偿系统设计过程中，应采用远程控制的方式，实现无功补偿控制。同时，系统内部装配了以异步风力发电机为主的感应型设备，因此在系统架构中应包含自动控制模式，进一步减少电网内的无功损耗。该无功电压控制系统的架构设计如下：

无功电压控制系统分为两部分，上层为系统控制层，主要负责电压调度，集中控制风电场内的电压和无功功率。主要设备包括主机、事件打印机、工作站等等，设备之间使用以太网连接，想要增强设备稳定性，可以采用双机冗余方式安装主机。下层为设备控制层，主要负责实现就地无功补偿和变电站电压的无功控制，其与上层系统的连接主要依靠以太网。该控制层工作时候能对设备电压、无功功率、功率因素等参数进行分析控制，并计算出无功补偿容量，保证电网内电压稳定，减

少损耗。下图4为风电场无功电压控制系统示意图。

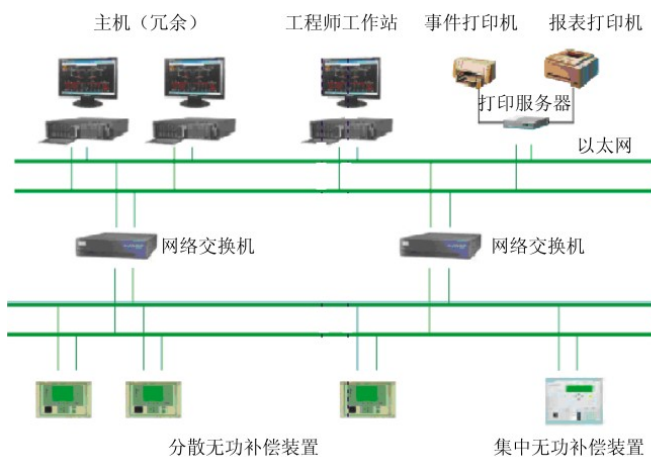


图4 风电场无功电压控制系统示意图

2. 控制原理与系统功能

无功电压自动控制系统运行时只需调节电压调节器就能实现电容器、电抗器的综合控制，稳定输出电压，合理调节系统无功功率。其控制原理如下，电压自动控制系统借助晶闸管切投电容实现电压控制，且该装置能及时响应系统内的电荷变化，自动调节电容器组，保持电压稳定^[4]。

该系统基本功能如下：（1）电网电压优化。该功能能实现电网内电压的自动调节，减少变压器分节开关调节次数，避免出现调节振荡问题。（2）电网内的无功功率优化。该功能主要是指在电网内变电站电压处于稳定范围内时，系统可以控制电网中的无功功率流向，增强其合理性，实现无功功率的就地平衡。从电网对电压与无功变化的实际需求出发，系统能综合决策不同级别电容器组的投入顺序，以增强电网运行的稳定性。

（3）无功电压综合优化。该功能主要是通过控制电容器的投入，降低电网负荷。以电压超过额定标准的情况为例，此时系统能先降低主变分接开关挡位，若还无法达到要求，直接切断电容器。（4）网损优化。当电网系统内的电压与无功功率均控制在有效范围内时，系统能在检测网损灵敏度的基础上调整设备控制顺序，一方面可以确保电压稳定，另一方面可以节省运维费用。（5）逆调压。该功能主要是指系统能自动检测当前电网的负荷情况，用电高峰情况下电压偏上限运行，反之则偏下限运行。

3. 系统参数设计

无功电压自动控制系统的参数设计主要包括以下几个方面。

一是控制对象与控制时间确定。风电场的电气一次部分设计中使用无功补偿技术，主要是用于增强对无功损耗的控制。通常情况下，无功功率因数在0.95与迟相0.95之间，电压调节范围在2%左右，就地无功功率的响应时间在20ms以内，变压器内无功功率响应时间在4ms以内^[5]。

二是系统运行环境参数与网络技术参数确定。无功自动电压系统的运行与外界环境有密切的关联，下表1

为该系统应用时的环境数据。网络技术参数一般可由用户指定，或是根据当前的网络标准设定，想要确保数据传输效果，应保持其速率在100M以上。

表1 无功电压自动控制系统应用环境数据

影响因素	条件
最高温度	+ 45℃
最低温度	- 45℃
海拔高度	≤ 3000m
相对湿度	70%

三是控制器技术指标以及技术保障要求。在控制器技术指标参数的选择上，应包含三相电压、电流、功率因数，系统内的有功功率、无功功率，每日电压、电流最大值与最小值等内容，上述数据应保存定期更新，保存时间为90天。在技术保障要求上，系统运行时应满足以下条件。首先当电网内某相电压出现异常现象时系统能立刻切断电容器；其次电网内出现缺相、零序超限等问题，系统能切断电容器；最后，在恢复系统运行前，应做好检验工作并保持上回路断开。

（四）应用效果分析

某风电场结合自身需求，在计算电网内实际产生的无功损耗的基础上，确定无功补偿方式与容量，并完成了相应装置的安装。该风电场的集电线路电压等级为35kV，线路损耗估算为9.29Mvar，变压器的无功损耗约为41.57Mvar，无功损耗共计50.86Mvar。从实际损耗出发，相关人员设计了一套15Mvar的动态容性无功补偿装置，在分析比对不同无功损耗技术的基础上，选择了电压调节型无功补偿装置，整体上产生的有功损耗较小，且运维简单、成本投入较少，得到了较好的无功补偿效果。

结论

综上所述，在风力发电技术不断优化更新的背景下，相关人员应重视风电场电气一次部分设计工作，做好无功补偿以减少无功损耗，进一步提升发电效率。同时应灵活利用各种无功补偿技术，在无功电压自动控制系统的辅助下，实现无功补偿目的，推动风力发电场的可持续经营。

参考文献

[1] 曹晨光. 风电场并网对电网电能质量的影响分析[J]. 电气时代, 2023, (05): 60-62.
 [2] 王飞飞, 王锦涵, 王文钊. 新能源微电网中的无功补偿技术优化分析[J]. 集成电路应用, 2023, 40(02): 120-121.
 [3] 王浩. 基于RTDS的风电场AVC系统动态建模研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2021, (21): 112-113.
 [4] 叶晖, 李爱魁, 张忠. 基于储能的无功补偿技术综述[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(06): 2209-2217.
 [5] 华梅. 风电场无功补偿方法运行特点及优化措施[J]. 设备管理与维修, 2020, (12): 42-43.
 作者简介: 邹泽起(1990-), 男, 汉族, 湖北仙桃人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 电气工程及其自动化。