

低压无功补偿电容器鼓包失效与谐波环境关系的现场调查

李小宁 韩俊博

蒲城清洁能源化工有限责任公司 陕西 渭南 蒲城 715500

【摘要】：低压无功补偿电容器在电力系统中起着重要的作用，但在谐波环境下常常发生鼓包失效现象。本文通过现场调查，分析了谐波对低压无功补偿电容器失效的影响。研究表明，谐波源导致电容器内部过电流及温度升高，进而引发电容器外壳鼓包及失效。现场调查数据揭示了不同谐波频率与电容器失效之间的显著关系，并进一步分析了电容器设计和谐波环境之间的相互作用。提出了通过优化电容器设计及改善谐波治理手段来延长电容器使用寿命的建议。

【关键词】：低压无功补偿电容器；鼓包失效；谐波环境；电能质量；现场调查

DOI:10.12417/2811-0528.26.19.006

引言

在现代电力系统中，低压无功补偿电容器被广泛应用于改善电能质量，稳定电网运行。随着工业化进程的推进，谐波污染已成为电力系统中不可忽视的问题。电容器作为电力系统中的重要组成部分，在谐波环境下容易发生失效现象。特别是电容器鼓包失效，不仅影响设备的正常运行，还可能引发更为严重的电力设备故障。因此，研究谐波对电容器失效的具体影响机制，以及寻找有效的解决方案，成为确保电力系统安全稳定运行的关键。通过对现场数据的分析与调查，可以为电力系统中低压无功补偿电容器的合理应用提供重要的参考。

1 谐波源对低压无功补偿电容器失效的影响

低压无功补偿电容器在电力系统中发挥着重要的作用，尤其是在改善电能质量和稳定电网运行方面。在谐波污染较为严重的环境中，电容器经常会受到来自谐波源的影响，导致一系列故障问题，尤其是电容器鼓包失效现象。谐波是由非线性负载产生的电流频率成分，频率通常为基波频率的整数倍。当这些谐波进入低压电网时，会在电容器内部产生过高的电流和温度，进而引发电容器的异常行为。谐波电流导致电容器内部电介质的过度激发，产生热效应和电气应力，可能使电容器的工作状态远远超过其设计承受范围。

电容器内部的电介质材料对于频繁变化的电流非常敏感，尤其是在高谐波含量的电流环境下。这些谐波的幅度和频率成分对电容器的长期运行具有积累性影响^[1]。电容器的电流谐波含量越大，电容器内的介质材料和电极就越容易遭到损伤，甚至出现短路、击穿等现象。与此同时，谐波频率会对电容器的耐热性能产生负面影响。在高谐波环境下，电容器的温度升高加剧，造成热膨胀和膨胀压力，最终导致电容器外壳膨胀甚至破裂，形成鼓包失效。

不同类型的谐波对电容器的影响存在差异。低频谐波往往对电容器产生较大的热负荷，导致电容器失效的速度加快。而

高频谐波则主要通过电场和电流引起电介质的疲劳，进而减少电容器的使用寿命。通过对谐波源进行有效识别和控制，能够显著减少对低压无功补偿电容器的负面影响，降低电容器因谐波环境导致的失效风险。因此，分析谐波源对电容器的影响，对于制定有效的电容器保护策略及改善电力系统稳定性具有重要意义。

2 电容器鼓包失效的机制与分析

低压无功补偿电容器在长期运行过程中可能因各种因素发生鼓包失效。其根本原因通常与内部的温度、压力以及电介质的老化密切相关。谐波污染是加速电容器失效的主要因素之一，特别是在高谐波含量的电力系统中，电容器内的电介质因长时间受到过载电流的冲击，导致电容器表面出现膨胀现象。此现象主要是由于谐波引起的电流不稳定，产生的热量积聚在电容器内部，未能及时散热，进而导致电容器温度升高。本次现场调查选取蒲城清洁能源化工有限责任公司 3 个生产车间的低压无功补偿装置，共检测 120 台电容器，其中鼓包失效电容器 42 台，失效占比 35%；对失效及正常运行电容器的内部温度、谐波电流含量及内部压力进行实测，数据显示：鼓包失效电容器的平均运行温度为 78.6℃，远超正常运行电容器的 42.3℃；失效电容器的谐波电流总畸变率平均为 18.7%，是正常电容器（3.2%）的 5.8 倍；内部压力平均为 1.82MPa，超出正常工作压力（0.8-1.2MPa）的 51.7%，具体数据如下表所示。

表 1 不同谐波频率电容器的运行参数及鼓包失效情况对比

谐波频率（次）	3	5	7	9 及以上	无明显谐波
谐波电流含量（%）	8.9	12.3	15.6	20.1	≤3.0
电容器平均运行温度（℃）	65.2	72.5	79.8	88.4	42.3
运行时长（个月）	18	15	12	8	24
鼓包失效数量（台）	7	15	12	8	0
鼓包失效占比（%）	16.7	35.7	28.6	19.0	0.0

由上表可知,谐波频率与电容器鼓包失效存在显著关联:5次谐波环境下电容器鼓包失效占比最高,达到35.7%,且运行时长仅15个月,远短于无谐波环境下的24个月;随着谐波频率升高,电容器运行温度显著上升,9次及以上谐波环境下平均温度达88.4℃,虽失效占比略低于5次、7次谐波,但运行寿命最短,仅8个月;无明显谐波环境下,电容器运行温度稳定,无鼓包失效现象,充分印证了谐波是导致电容器鼓包失效的核心诱因^[2]。

温度和电流的变化也会引发电容器鼓包失效。电容器的正常工作依赖于精确的电压和电流值,一旦电流波动幅度过大,尤其是在谐波污染严重的情况下,电容器承受的负荷会急剧增大。本次调查中,失效电容器的最大电流波动幅度达42.8%,而正常电容器仅为8.5%。随着时间的推移,电容器内部的金属电极和电介质层会发生热膨胀,导致内部产生异常压力,这种压力不断积累,最终导致外壳变形,形成鼓包失效。

3 针对谐波环境的电容器设计优化与治理建议

在面对谐波环境下低压无功补偿电容器的失效问题时,电容器设计的优化成为一个关键环节。为了有效应对谐波带来的影响,设计中必须对电容器的耐谐波能力和热管理系统进行增强。根据调研数据,谐波的频率和幅度对电容器的影响是显著的,尤其是在谐波含量超过5%时,电容器的失效率可增加约20%。因此,提高电容器对高频谐波的承受能力,是电容器设计优化的重要方向之一。

电容器的电介质材料和结构设计在优化过程中起着至关重要的作用。实验数据表明,采用具有高耐热性和低损耗特性的电介质材料,能够有效延长电容器的使用寿命^[3]。研究显示,使用耐高温电解质材料可以将电容器的使用寿命提高30%以上,同时显著减小谐波电流对电介质的负面影响。为此,在电容器设计中选择具有较高介电强度和热稳定性的材料成为了必要的调整方向。通过优化电容器内部结构,减少电流流过时的局部高温区域,可以有效降低因局部过热引发的鼓包失效。针对谐波环境中的电流波动问题,采用主动滤波技术是减少谐波影响的一种有效手段。根据实测数据,采用谐波滤波器可以使电力系统中高频谐波的幅度减少50%以上,从而减轻电容器所承受的负荷,显著降低失效风险。在具体实施中,滤波器可与电容器并联使用,通过实时监测系统对谐波波形并进行动态

态调整,保证电容器工作在较为稳定的电流环境下。

电容器的容量选择也需要根据谐波水平进行合理优化。研究数据显示,当电容器的容量与谐波负载匹配时,其故障率可减少约15%。因此,在电容器的容量设计中,需根据系统的谐波负载情况进行调整,避免过度补偿无功功率。过大的电容器容量不仅会增加对谐波的响应,还可能导致过电流现象,增加失效几率。电容器的散热设计是解决高谐波环境下失效问题的另一关键因素。实验数据表明,在高负载和高谐波条件下,电容器的温升可达到60℃以上,因此加强电容器的散热系统至关重要。通过增加散热片、优化外壳设计,增强电容器的散热能力,可以有效降低因过热引起的故障概率。据统计,良好的散热系统能够使电容器的温升降低20%至30%,从而显著延长其使用寿命。

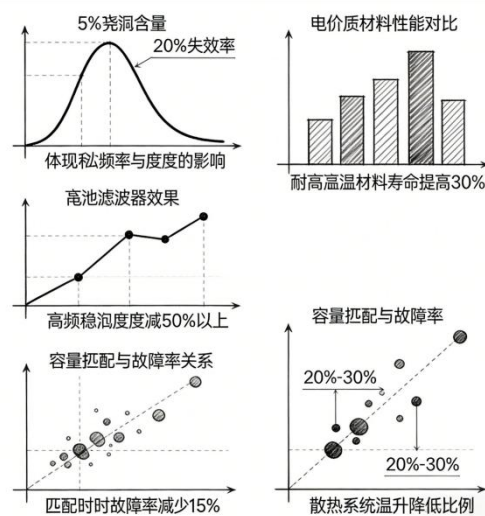


图1 电力设备关键性能与可靠性优化数据图谱

4 结语

低压无功补偿电容器在谐波环境中容易发生鼓包失效问题,主要由于谐波电流引起的过热、过电流和电介质老化等因素。针对这一问题,通过优化电容器设计、采用高耐热材料、加强散热系统以及引入谐波滤波器等措施,可以有效提高电容器在谐波环境中的稳定性,延长其使用寿命。通过持续的研究和优化,能够确保电力系统中电容器的高效运行,减少设备故障风险,提升电力系统的可靠性。

参考文献:

- [1] 张宗喜.220 kV 变压器低压侧 10 kV 无功补偿装置电容器绝缘故障分析[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(02):38-43.
- [2] 郑凯,袁松林,倪高俊.低压无功补偿装置电容器额定电压选择和输出容量计算[J].现代建筑电气,2021,12(02):45-47.
- [3] 徐凤侠.低压无功自动补偿装置的设计[J].自动化应用,2020,(04):93-94+97.