

电力电容器的精准相控投切与过电压抑制

俞峰¹, 范克剑², 陈杰萍³

(1. 绍兴市上虞电力电容器有限公司, 浙江 绍兴 312300;

2. 浙江福特机械制造有限公司, 浙江 绍兴 312300;

3. 浙江春晖仪表股份有限公司, 浙江 绍兴 312300)

摘要 电力电容器精准相控投切是提升电网无功补偿精度的核心技术, 投切过程伴随的过电压问题制约技术应用实效。本文剖析精准相控投切的原理与关键电气参数匹配机制, 阐释相控触发同步、开关选型优化、控制算法设计三类关键技术, 深入解析暂态过程、相角偏差、谐波叠加诱发过电压的内在机理, 从串联电抗器设计、过电压吸收装置参数优化、控制策略预判抑制三个维度提出过电压抑制方案, 以期电力电容器安全高效投切提供理论参考。

关键词 电力电容器; 精准相控投切; 过电压抑制

中图分类号: TM53

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.006

0 引言

电网无功功率平衡直接影响供电质量与系统稳定性, 电力电容器投切是无功补偿的主流技术手段^[1]。传统随机投切方式存在暂态冲击大、补偿精度低等弊端, 精准相控投切技术凭借相位精准控制优势成为研究热点, 但其投切过程易因暂态特性、控制偏差及电网谐波产生过电压, 威胁电力设备安全运行。本文围绕精准相控投切原理、关键技术与过电压抑制展开研究, 旨在解决技术应用中的核心问题, 推动无功补偿技术升级。

1 电力电容器精准相控投切的原理

电力电容器精准相控投切的核心是控制投切开关动作时刻, 使电容器投入电网瞬间的电压、电流与电网参数匹配, 抑制投切暂态过电压、过电流现象。电网电压电流呈正弦变化特性, 传统随机投切因开关动作时刻不受控, 易在不利相位投入形成瞬时电位差, 引发电荷急剧转移与暂态冲击。精准相控投切通过实时采集并同步处理电网电压信号, 确定最优投切相位角, 确保开关在理想相位通断。理想投切条件为电容器预充电电压与电网对应相位电压幅值相等、相位相同, 此时投切回路电压差趋近于零, 暂态电流可控。基于电网电压正弦特性构建投切相位控制模型, 关系为 $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_0)$, 式中: $u(t)$ 为电网瞬时电压, U_m 为电压幅值, ω 为角频率, φ_0 为初始相位角。系统

实时检测相位参数, 触发开关在电压匹配时刻导通, 信号采集的实时性与相位判断的准确性直接决定了投切精准度, 延迟会导致相位偏差, 需构建高精度信号采集与同步处理机制。

2 电力电容器精准相控投切的关键电气参数匹配机制

电力电容器精准相控投切的理想效果实现依赖于投切系统中核心电气参数的合理匹配, 这些参数涵盖电容器自身参数、投切开关参数与电网系统参数, 参数间的匹配度直接决定了相控投切的精准性与暂态抑制效果^[2]。电容器电容量是核心参数之一, 其数值需根据电网无功补偿需求确定, 同时需与电网电压等级匹配, 电容量偏差会导致电容器等效容抗变化, 进而改变投切瞬间的电压匹配条件, 其与容抗的关系可通过公式表示: $X_c = 1/(2\pi f c)$, 式中: X_c 为电容器容抗, f 为电网频率, c 为电容量。投切开关参数需与电容器参数及电网电流等级适配, 开关的导通压降、关断时间与通流能力, 需满足投切回路的电压电流特性, 若开关通流能力不足或关断时间过长, 会导致投切过程中出现开关损耗过大或暂态电压叠加问题。电网系统参数中的电压幅值、频率稳定性与谐波含量, 也会影响参数匹配效果, 电压幅值波动会改变理想投切相位的电压阈值, 频率偏移则会导致相控时刻计算偏差。表1列出核心参数匹配状态与对应投切效果的关联, 为参数匹配设计提供依据。

作者简介: 俞峰 (1968-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 机械设计与制造。

表 1 电力电容器精准相控投切核心参数匹配状态与投切效果关联

核心参数	匹配状态	投切效果
电容器容量	与电网无功需求、电压等级匹配	暂态电流小，补偿效果优
电容器容量	偏离电网无功需求、电压等级	暂态电流增大，补偿精度下降
投切开关通流能力	匹配投切回路最大电流	开关损耗小，动作可靠性高
投切开关通流能力	低于投切回路最大电流	开关易过热，存在故障风险
电网频率	稳定在额定频率	相控时刻计算精准，投切同步性好
电网频率	出现明显偏移	相控时刻偏差，暂态冲击增大

3 电力电容器精准相控投切的关键技术

3.1 相控触发信号的高精度同步

相控触发信号的高精度同步以电网电压信号为基准，通过信号采集、预处理与同步校准构建完整技术链路^[3]。电压信号采集环节采用高精度电压传感器，确保采集信号能够真实反映电网电压的相位与幅值特性，信号预处理模块则对采集到的原始信号进行滤波去噪处理，消除电网谐波与电磁干扰对信号纯度的影响。同步校准环节通过锁相环技术实现触发信号与电网电压信号的相位锁定，锁相环能够实时跟踪电网电压的相位变化，动态调整触发信号的输出时刻。电网电压频率波动会导致相位跟踪偏差，因此需在同步校准环节引入频率自适应调节机制，使锁相环的跟踪范围覆盖电网正常频率波动区间，确保触发信号与电网电压信号保持严格的相位同步关系，为精准相控投切提供基础保障。

3.2 投切开关器件的选型与性能优化

投切开关器件的选型需结合电力电容器参数与电网运行工况确定核心选型指标，包括通流能力、关断时间、耐压等级与导通压降等。晶闸管开关具备响应速度快、通流能力强的特性，适用于高频次投切场景，但其导通压降较大，易产生额外能耗；机械开关导通压降小、损耗低，却存在响应延迟问题，难以满足高精度相控投切的瞬时动作要求。混合开关通过晶闸管与机械开关的协同工作，兼顾响应速度与低损耗优势，已成为精准相控投切系统的主流开关选型。性能优化需针对开关器件的固有特性展开，对于晶闸管开关，可通过优化驱动电路参数降低导通压降；对于混合开关，需设计合理的换流控制策略，实现晶闸管与机械开关的平滑切换，避免切换过程中出现电压冲击或电流突变。

3.3 精准相控投切的实时控制算法设计

精准相控投切的实时控制算法以电网电压相位检测结果为输入，核心功能是计算最优投切时刻并输出

触发指令。电压相位检测算法需具备快速响应能力，通过滑动窗口傅里叶变换实现电网电压相位的实时提取，该算法能够有效抑制谐波信号对相位检测精度的影响，提升相位检测的稳定性。最优投切时刻计算算法基于电力电容器投切的理想相位条件，结合电网电压幅值与频率动态调整投切相位角，确保电容器投入瞬间电压匹配。控制算法需引入预测补偿机制，考虑信号采集、算法运算与开关动作的延迟时间，通过提前预测电网电压相位变化趋势，补偿延迟带来的投切时刻偏差。算法的实时性通过硬件平台与软件优化协同保障，硬件层面采用高性能微处理器提升运算速度，软件层面通过精简算法复杂度、优化程序执行流程减少运算耗时。

4 电力电容器精准相控投切过程中的过电压产生机理

4.1 投切瞬间的暂态过电压形成

电力电容器投切瞬间的暂态过电压源于电网与电容器之间的电荷快速转移，电容器在投入前内部电荷为零，电网电压则处于动态变化过程中，二者接触瞬间会形成巨大电位差。电位差驱动电荷在极短时间内流向电容器极板，该过程伴随剧烈的能量交换，电荷转移速度远超稳态运行状态，进而引发回路中的电流突变。电流突变会在回路阻抗上产生压降，阻抗压降与电网电压叠加后形成暂态过电压，其幅值与电位差大小、电荷转移速度呈正相关关系^[4]。电容器投切回路中的电感元件会阻碍电流突变，电感元件产生的反电动势会与电网电压进一步叠加，同时电荷转移过程中的电磁振荡会延长暂态过电压的持续时间，振荡频率由回路中的电感与电容参数共同决定，振荡衰减速度则与回路电阻相关。

4.2 相控角度偏差引发的过电压

相控角度偏差是精准相控投切系统过电压产生的重要诱因，理想相控角度以电网电压与电容器预充电

电压完全匹配为目标,实际运行中信号采集延迟会导致相控角度出现偏差。信号采集环节的传感器响应滞后会使检测到的电网电压相位滞后于实际相位,控制算法运算耗时会进一步扩大相位偏差范围,偏差角度直接改变投切瞬间的电位差大小。偏差角度越大,投切瞬间的电位差越大,电荷转移过程的能量交换越剧烈,过电压幅值也随之升高。开关器件的动作延迟会加剧相控角度偏差的影响,开关触发指令发出后,器件导通或关断存在固有时间延迟,该延迟会使开关实际动作时刻偏离指令时刻,等效于相控角度偏差进一步扩大。开关器件的动作一致性差会导致三相投切不同步,三相电压不平衡会引发零序电压分量,零序电压分量会与正序电压分量叠加形成过电压。

4.3 电网谐波对投切过电压的叠加

电网谐波会改变精准相控投切过程中的电压特性,电网中的非线性负载会产生大量谐波电流,谐波电流流经电网阻抗会产生谐波电压,谐波电压与基波电压叠加形成畸变的电网电压。畸变电压使相控角度判断失去稳定基准,谐波电压的相位与幅值随机变化,控制算法难以精准捕捉理想投切时刻,投切瞬间的电位差因畸变电压存在而显著增大。谐波电压会使电容器投切回路产生谐振现象,当谐波频率与回路固有频率接近时,回路会发生串联谐振或并联谐振,谐振会放大回路中的电压与电流幅值,过电压幅值可达到基波电压的数倍。不同次数的谐波对投切过电压的叠加效果存在差异,低次谐波频率接近电网基波频率,易与回路固有频率产生谐振,高次谐波幅值较小,其叠加效果相对较弱,但高次谐波数量众多,多频次谐波的综合叠加会显著提升过电压的复杂性。

5 电力电容器精准相控投切过电压抑制策略

5.1 串联电抗器的过电压抑制设计

串联电抗器通过改变投切回路的阻抗特性实现过电压抑制,电抗器的电感值需与电容器容量及电网参数协同匹配,电感值过小则抑制效果不足,电感值过大则会增加回路无功损耗并影响补偿效果。电抗器的核心作用是限制投切瞬间的暂态电流上升率,电流上升率的降低能够减缓电荷转移速度,进而削弱暂态过电压的幅值,同时电抗器可调整回路固有频率,使回路频率偏离电网谐波频率以规避谐振风险^[5]。电抗器的选型需重点考量额定电感值、额定电流与耐压等级,额定电流需满足投切回路的最大工作电流,耐压等级需高于电网最高运行电压与可能出现的过电压峰值。电抗器的安装位置需设置在电容器与投切开关之

间,该安装方式能够同时抑制投切开关动作与电容器充放电引发的过电压,电抗器的铁芯材质需选用低损耗硅钢片,以此降低电抗器在稳态运行过程中的能量损耗。

5.2 专用过电压吸收装置的参数优化

专用过电压吸收装置的核心类型包括金属氧化物避雷器、阻容吸收器与非线性电阻吸收器,不同类型吸收装置的工作原理与适用场景存在差异,参数优化需围绕装置的核心性能指标展开。金属氧化物避雷器的参数优化聚焦于标称放电电流与残压,标称放电电流需匹配投切过电压的最大冲击电流,残压需控制在设备绝缘耐受电压范围内,同时需优化避雷器的响应时间,确保避雷器在过电压产生初期迅速动作。阻容吸收器的参数优化需兼顾电阻阻值与电容容量,电阻阻值需满足能量耗散需求,电容容量需与回路电容协同以调整吸收频率,二者的参数匹配需通过仿真计算确定,避免参数不匹配导致吸收装置失效或产生新的振荡。非线性电阻吸收器的参数优化针对非线性系数与通流容量,非线性系数决定电阻阻值随电压变化的速率,通流容量决定吸收装置的抗冲击能力,优化后的参数需确保吸收装置在正常运行电压下呈高阻态,在过电压状态下呈低阻态,以实现能量吸收。

6 结束语

电力电容器精准相控投切技术的实现需依托参数匹配机制与核心技术体系的协同作用,相控触发信号同步精度、开关器件性能、控制算法实时性直接决定了投切精准度。过电压的产生是暂态过程、相角偏差、电网谐波多因素耦合的结果,单一抑制手段难以实现全面防控。硬件配置优化与控制策略调整相结合的协同抑制体系,可有效降低过电压幅值与发生概率。

参考文献:

- [1] 李洋. 电力电容器组常见故障原因及预防措施探讨[J]. 中国设备工程, 2025(23):166-168.
- [2] 马钊昊, 刘志林, 王琼, 等. 并联电容器过电压事故分析及其抑制措施现场测试验证[J]. 电瓷避雷器, 2025(05): 70-76.
- [3] 杨晓磊, 曲仕响. 电容器组安装优化策略及其对电力系统稳定性影响[J]. 电力设备管理, 2025(11):278-280.
- [4] 江兴考. 电力电容器在高温环境中的性能衰退与寿命预测[J]. 产品可靠性报告, 2025(03):101-102.
- [5] 江兴考. 电力电容器内部温度控制对电力系统稳定性的影响[J]. 灯与照明, 2025, 49(01):146-149.