

高压直流断路器 IGBT 串联均压控制技术

芦智刚

宁夏诚智信电力建设咨询有限公司 宁夏银川

【摘要】随着直流输电技术快速发展，高压直流断路器 IGBT 串联均压控制成为保障系统稳定运行的关键。IGBT 串联应用中，因参数差异、杂散电感等因素导致电压不均，易引发器件损坏。阐述 IGBT 串联电压不均产生机制，分析静态均压、动态均压控制策略，探讨驱动电路优化、缓冲电路设计及主动控制在均压控制中的作用。研究表明，多种控制策略协同运用可有效提升均压效果。对提升高压直流断路器性能、推动直流输电技术发展具有重要意义。

【关键词】高压直流断路器；IGBT 串联；均压控制；驱动电路；缓冲电路

【收稿日期】2025 年 3 月 10 日 **【出刊日期】**2025 年 4 月 11 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250127

High-voltage DC circuit breaker IGBT series voltage equalization control technology

Zhigang Lu

Ningxia Chengzhixin Electric Power Construction Consulting Co., Ltd, Yinchuan, Ningxia

【Abstract】 With the rapid advancement of DC transmission technology, the IGBT series voltage equalization control of high-voltage DC circuit breakers has become crucial for ensuring stable system operation. In IGBT series applications, voltage imbalance caused by parameter differences and stray inductance can easily lead to device failure. This paper explains the mechanisms behind IGBT series voltage imbalance, analyzes static and dynamic equalization control strategies, and explores the roles of drive circuit optimization, buffer circuit design, and active control technology in equalization control. Research indicates that the combined use of multiple control strategies can significantly enhance equalization performance. This is of great significance for improving the performance of high-voltage DC circuit breakers and advancing DC transmission technology.

【Keywords】 High-voltage DC circuit breaker; IGBT series; Equalization control; Drive circuit; Buffer circuit

引言

在高压直流输电系统中，IGBT 串联是实现高电压开断的重要方式。由于制造工艺限制，各 IGBT 器件的阈值电压、通态电阻等参数存在天然差异；线路寄生电感、电容等杂散参数也会影响电压分布。这些因素共同作用，会导致 IGBT 串联时电压分配不均，使部分器件承受过电压而损坏，严重影响系统可靠性。研究 IGBT 串联均压控制技术，对提升高压直流断路器性能、保障直流输电系统稳定运行至关重要。本文聚焦该技术，从理论建模、仿真分析到实验验证，系统探究有效均压控制方法。

1 电压不均问题

在高压直流断路器的实际运行场景中，IGBT 串联方式虽为实现高电压等级的核心手段，却因器件

自身与系统环境的多重因素，导致电压分配失衡现象频发。从器件层面剖析，即使同一批次的 IGBT，其阈值电压与导通电阻也存在微观差异。这种参数离散性如同基因差异，使得每个 IGBT 在相同电路环境下呈现出不同的电学特性。当多个 IGBT 串联工作时，这些差异被逐级放大，如同串联的水桶，因桶壁高度不一导致水位失衡，最终造成电压承受能力的不平衡。

线路结构同样是电压不均的关键诱因。高压直流系统中，杂散电感与寄生电容如同无形的暗礁，其不规则分布严重干扰电流的平稳传输。在 IGBT 开关瞬间，电流的急剧变化会在杂散电感中产生感应电动势，寄生电容则会因充放电过程产生电压波动^[1]。这些瞬态干扰如同惊涛骇浪，使原本脆弱的电压

平衡被瞬间打破。更严峻的是,电压分配偏差一旦超过安全阈值,承受过压的 IGBT 将面临雪崩击穿风险,犹如多米诺骨牌,一个器件的失效可能引发整个串联模块的连锁崩溃,直接威胁系统的安全运行。

电压不均问题不仅危及设备安全,更成为技术发展的瓶颈。对于高压直流断路器而言,稳定的电压分配是实现可靠开断与高效运行的基础。当电压失衡时,系统需预留更大的安全裕度,这无疑增加了设备成本与体积^[2]。频繁的过压冲击会加速器件老化,缩短设备使用寿命,限制了高压直流技术在长距离输电、智能电网等领域的应用拓展。解决电压不均问题已成为提升高压直流断路器性能的核心课题。

2 均压控制策略

静态均压作为最基础的控制手段,其实现原理建立在精妙的电路设计之上。在串联 IGBT 器件的回路中,并联电阻的布局恰似精心规划的城市交通网络,为电流开辟多条分流路径。当 IGBT 处于关断状态时,这些均压电阻如同交通指挥岗亭,强制驱动电流均匀地通过每一条支路,使得串联的每个 IGBT 器件两端电压逐渐趋于平衡。但这种平衡的实现绝非易事,工程师们需要在均压效果与功率损耗之间进行一场精密的博弈。试想将均压电阻视为水龙头的阀门,阻值调得过小,虽然能让水流(电流)分配得更加均匀,却会导致水资源(能量)持续不断地浪费;而将阀门拧得太紧,水流的均匀性又会大打折扣,无法保障每个用水点(IGBT 器件)的稳定供水,甚至可能因压力不均造成管道(器件)损坏。

动态均压策略则将关注点转向了 IGBT 更为活跃的“舞台时刻”——开关暂态过程。在这个瞬间,电路中会产生剧烈的电压波动和电流尖峰,犹如汹涌的海浪冲击堤岸。此时引入的缓冲电路,就像在海岸线上建造的层层防波堤,由电容与电感组成的缓冲网络能够高效吸收这些能量浪涌,减缓电压变化的速率,避免 IGBT 器件承受过高的电压应力。与此驱动电路的优化工作同样至关重要。驱动信号的传输过程可类比为传递接力棒的接力赛,任何一个环节的延迟或失误都可能导致“队员”(IGBT 器件)动作不一致^[3]。通过改进信号传输路径,增强驱动电路的驱动能力,就像为接力队员配备更专业的训练和装备,确保多个 IGBT 能够如同训练有素的团队般同步开通与关断,最大程度减少因时序差异造成的电压失衡现象。

主动控制技术标志着均压策略迈入了智能化时

代。它不再局限于被动应对电压波动,而是为整个系统赋予了“思考”和“决策”的能力。借助高精度传感器实时监测每个 IGBT 的电压状态,如同给系统安装了无数双敏锐的眼睛;结合先进的控制算法,又像是为系统注入了智慧的大脑。一旦监测到电压偏差,这套智能系统便会立即启动响应机制,快速调整驱动信号,动态补偿由于器件参数差异、线路阻抗不同等因素造成的电压不均^[4]。这种自适应调节能力赋予了系统强大的环境适应力,无论是面对稳态运行中的微小电压波动,还是遭遇电网短路、雷击等极端故障工况,主动控制技术都能在毫秒级的时间尺度内做出反应,重新分配电压,为高压直流系统构建起一道坚不可摧的保护屏障,确保整个电力网络的稳定运行。

3 控制技术优化

驱动电路作为 IGBT 的“神经中枢”,其性能对器件的开关一致性有着决定性影响。想象一下,当驱动信号的上升与下降速度得到显著提升,就如同为 IGBT 注入了强大的“加速剂”,能够大幅缩短开关时间,有效避免因开通与关断不同步而引发的电压不均现象。这不仅能让 IGBT 更快地响应控制指令,还能显著提升其工作效率。优化驱动回路布局、降低杂散电感同样至关重要。这就好比清理信号传输道路上的“阻碍物”,确保驱动信号能够以最快的速度、最高的稳定性传递到每一个 IGBT 器件。这种精细化的设计,不仅能够增强器件之间的协同工作能力,还能有效降低开关损耗,为提升整个系统的运行效率奠定坚实基础。

缓冲电路的参数优化也是均压控制技术的关键一环。电容与电感的选型就像是调配精密药剂,需要根据系统的电压等级、电流大小以及开关频率进行定制化设计。合适的电容参数能够有效抑制电压尖峰,避免过高的电压对器件造成损害;而电感则可以平滑电流变化,确保电流的稳定流动。两者相互配合,就像坚固的防线,抵御各种瞬态干扰对系统的影响^[5]。不仅如此,缓冲电路的拓扑结构设计也不容忽视。通过采用新型电路架构,可以进一步提升其对电压波动的抑制能力,为 IGBT 创造更加稳定的工作环境。

主动控制技术与先进算法的深度融合,更是为均压控制带来了质的飞跃。基于模型预测控制、模糊控制等智能算法,系统能够提前感知电压不均的趋势,并主动调整驱动信号。这就如同赋予了系统“

未卜先知"的能力,使得均压调节更加具有预见性和精准性^[6]。多种控制技术的协同应用,构建起了一个立体化的优化体系:驱动电路提供快速响应,确保 IGBT 能够迅速对控制指令作出反应;缓冲电路实现瞬态抑制,保护器件免受电压波动的影响;主动控制达成动态平衡,维持系统的稳定运行。三者紧密配合,从根本上提升了 IGBT 串联均压性能,为高压直流断路器的稳定运行提供了可靠保障。

4 性能提升效果

优化后的均压控制策略与技术,犹如为高压直流断路器量身定制的精密调控系统,带来全方位的性能跃升。在以往,电压不均衡如同潜伏在设备内部的“隐形杀手”,不同 IGBT 器件承受的电压差异可能导致部分器件过早劳损,甚至引发连锁故障。而如今,先进的均压控制技术彻底改变了这一局面——它就像一位严谨的“电压管家”,通过智能调控机制,让每个 IGBT 都能在安全、稳定的电压范围内运行,如同为器件穿上了坚不可摧的“防护铠甲”。这种精准的电压分配,不仅彻底消除了过压损坏的潜在风险,更通过均衡的负载分担,有效延长了设备的使用寿命,显著减少了维护成本与停机时间。从系统整体视角来看,稳定的电压环境如同为串联模块注入了一剂“强心针”,大幅降低了器件间的应力差异,让整个系统的可靠性实现质的跨越,为高压直流输电系统的连续稳定运行筑牢了坚实屏障。

均压性能的显著改善,在能源传输领域掀起了一场“效率革命”。过去,电压不均会导致能量在传输过程中产生大量“内耗”,如同河道中的暗礁阻碍水流,造成能源浪费。而优化后的均压控制技术,恰似疏通河道的疏浚工程,通过减少因电压不均衡导致的额外损耗,让能源“水流”能够更加顺畅地奔涌至负载端^[7]。这种优化效果不仅提升了系统对能源的利用率,更有效降低了整体能耗,实现了能源传输的高效与环保。与此均压控制技术的进步还为高压直流断路器的设计带来了革命性变革。

从长远发展的战略高度来看,均压控制技术的突破堪称直流输电技术发展的里程碑,为行业发展开辟了全新赛道。稳定可靠的 IGBT 串联运行模式,赋予高压直流系统更强的适应性与灵活性,使其能够更好地满足智能电网对电力系统可控性的严苛要求。在新能源蓬勃发展的时代背景下,无论是大规模可再生能源的稳定接入,还是跨区域电力互联的

高效实现,优化后的均压控制技术都将扮演不可或缺的关键角色^[8]。它如同支撑桥梁的坚固基石,或是指引航船的明亮灯塔,推动高压直流输电技术在新能源消纳、城市配电网升级等诸多领域落地生根,为构建清洁、高效的现代能源体系注入源源不断的强劲动力,助力能源行业迈向绿色低碳的未来。

5 结语

高压直流断路器 IGBT 串联均压控制技术对直流输电系统意义重大。当前多种均压控制策略与技术已取得良好效果,但随着直流输电电压等级不断提高、系统复杂度增加,仍面临新挑战。未来,需进一步探索新型均压控制方法,结合新材料、新器件发展,提升均压控制精度与响应速度,增强高压直流断路器性能,以适应能源互联网建设对直流输电技术的更高要求。

参考文献

- [1] 编辑部.森萨塔科技推出新型高压直流智能熔断器 PyroFuse,助力高压系统安全升级[J].汽车与配件,2025,(09):71.
- [2] 温伟杰,胡铁伟,陈晓龙,等.典型配电故障下直流偏置电压形成及电压互感器熔断分析[J].电工技术学报,2025,40(01):226-240.
- [3] 杜乾,李冬,郭九旺,等.混合式高压直流断路器阻断故障电流原理研究[J].电气开关,2024,62(06):11-14.
- [4] 姜珊盼,刘鹏飞,李阳.高压直流断路器试验技术研究[J].产业创新研究,2024,(22):88-90.
- [5] 苏世霖.多端高压直流输电技术的应用[J].电子技术,2024,53(11):218-219.
- [6] 张锐.多端高压直流输电技术及其应用前景[J].电力设备管理,2024,(18):47-49.
- [7] 鞠鲁峰,何燕华,王群京,等.高压直流断路器中的 IGCT 功能性模型仿真研究[J].电气工程学报,2024,19(03):107-114.
- [8] 屠立忠,祝智祥,洪岑岑,等.一种具有限流功能的电容型高压直流断路器[J].浙江电力,2024,43(08):57-65.

版权声明:©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS