# 光伏直流变压器不闭锁零电压穿越策略

刘瑞煌<sup>1</sup>,杨景刚<sup>1,2</sup>,吴 丹<sup>3</sup>,姚金杰<sup>2</sup>,张宸宇<sup>1</sup>,袁宇波<sup>1</sup> (1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院,江苏南京 211103; 2. 东南大学 电气工程学院,江苏南京 210096;3. 国电南瑞科技股份有限公司,江苏南京 211106)

摘要:针对中压直流系统双极故障下光伏直流变压器的低电压穿越问题,首先基于双有源桥和全桥隔离电路 的子模块拓扑结构,分析光伏直流变压器正常运行时最大功率点追踪控制的快速实现方案。然后利用光伏 电池板输出特性,提出光伏直流变压器不闭锁穿越策略,该策略对故障时长不敏感,可实现严重故障下的零 电压穿越。进一步,针对故障穿越暂态过程中的过电压及子模块不均压问题,提出多控制策略间的平滑切换 方案,有效降低暂态过程中的过电压现象,改善子模块间的均压效果。最后在MATLAB/Simulink环境中搭 建仿真模型,验证所提策略的有效性。

关键词:光伏;直流变压器;零电压穿越;不闭锁;平滑切换 中图分类号;TM615;TM41 文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202208027

# 0 引言

光伏发电是解决能源危机和环境问题的重要途径<sup>[1]</sup>。光伏电源经汇集升压后可进行并网,传统的 交流并网方式存在输送容量小、损耗高、需要大量无 功补偿等缺点。随着直流配用电技术的发展<sup>[23]</sup>,基 于直流变压器(direct current transformer,DCT)的直 流并网方式得到了越来越广泛的关注,并已逐渐取 得了工程应用<sup>[45]</sup>。然而,虽然直流并网方式具有诸 多优点<sup>[6]</sup>,但由于现有光伏DCT故障穿越能力弱,使 得系统一旦发生故障,光伏DCT便闭锁跳闸,无法 进行故障穿越。

针对上述问题,在穿越策略方面,现有文献已针 对光伏逆变器开展了大量研究<sup>[7-8]</sup>,但由于DCT多采 用输入并联输出串联(input-parallel output-series, IPOS)的模块化拓扑<sup>[9-10]</sup>,与逆变器结构差异较大, 上述策略并不适用。针对模块化多电平换流器 (modular multilevel converter,MMC)等同为模块化 结构设备的故障穿越问题,文献[11]提出了一种具 有故障自清除能力的MMC子模块结构;文献[12]利 用全桥子模块能输出反压的特点,提出了一种MMC 不闭锁穿越故障的策略。上述策略对于光伏DCT 的低电压穿越策略具有一定借鉴意义,但由于拓扑 结构及应用场景不同,仍无法直接应用。

进一步,在光伏 DCT 故障处理及故障恢复方 面,文献[13]分析了光伏接入直流系统后的短路电 流暂态特性,利用高频分量实现直流线路故障识别

收稿日期:2021-10-08;修回日期:2022-01-28 在线出版日期:2022-08-19 基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0904700) Project supported by the National Key R&D Program of China(2018YFB0904700)

与定位,但是并未研究DCT的故障穿越性能。文献 [14]介绍了一种DCT高压侧故障的清除方法,但高 压侧电容在故障后迅速放电,不利于系统在故障清 除后的快速恢复。针对高压侧双极短路故障,文献 [15]提出了一种基于故障过渡电阻判断的故障协 调控制策略,可以判别暂时性故障和永久性故障,但 是当故障过渡电阻小于临界值时,DCT仍需闭锁。 综上所述,针对光伏DCT的故障处理策略,现有文 献多采用直接闭锁DCT的方案,易造成以下问题: ①不符合新能源低电压穿越的要求,系统瞬间失去 大量功率,不利于安全稳定运行<sup>[16]</sup>;②DCT在解闭锁 过程中冲击较大,容易造成器件损坏;③停机重启 时间漫长,影响故障恢复后的供电可靠性<sup>[17]</sup>;④停机 过程中光伏无法发出功率,造成弃光损失。故在新 能源渗透率大幅增长的背景下,为进一步突破光伏 直流并网技术,亟需提升光伏 DCT 的低电压穿越 能力。

考虑到目前工程上针对低压侧故障及单极接地 故障已有成熟保护及穿越策略,本文主要研究直流 系统高压侧双极故障下,光伏DCT的低电压穿越问 题。首先采用双有源桥(dual active bridge,DAB)加 全桥的两级式拓扑,分析正常运行时其最大功率点 跟踪(maximum power point tracking,MPPT)控制的 快速实现方案。接着利用光伏电池板的输出特性, 提出一种DCT不闭锁的零电压穿越策略,该策略对 故障时长不敏感。进一步,深入分析故障中不同控 制策略的切换过程,提出实现平滑切换的系列解决 方案。最后,在MATLAB/Simulink环境中搭建了 仿真模型,验证所提策略的有效性。本文虽针对光 伏DCT进行讨论,但分析方法同样适用于通过电力 电子变压器并入交流电网的其他光伏系统场景。

# 1 拓扑结构

本文以图1所示的光伏DCT升压汇集接入系统为研究对象。图中: $I_1, V_1 和 I_2, V_2 分别为光伏DCT输入电流、电压和输出电流、电压; V_{Clk}, V_{Clk}(k=1,2,..., N,N为子模块总数)分别为第<math>k$ 个子模块低压侧和高压侧电容电压; L为限流电感; K为直流负荷开关;  $U_2, U_g$ 分别为光伏DCT经限流电感滤波后的高压侧电压及电网电压;  $T_1 - T_4, Q_1 - Q_4, S_1 - S_4$ 均为DCT子模块的开关器件。



## 图1 光伏DCT拓扑结构

#### Fig.1 Topology structure of photovoltaic DCT

由图1(a)可知,光伏电源首先通过汇流母线实现能量汇集,然后通过本文提出的光伏DCT升压后并入直流电网。光伏DCT采用IPOS结构,其子模块拓扑如图1(b)所示,前级为DAB变换器,后级为全桥隔离电路。根据不同运行工况,DCT可运行于MPPT控制、故障穿越控制等不同模式。进一步,针对子模块控制,全桥隔离电路有2种工作模态:①模态1,开关管S<sub>1</sub>、S<sub>4</sub>导通,S<sub>2</sub>、S<sub>3</sub>关断,子模块电容电压 正向投入;②模态2,开关管S<sub>2</sub>、S<sub>3</sub>导通,S<sub>1</sub>、S<sub>4</sub>关断,子模块电容电压反向投入。具体如图2所示。

因此,通过调节不同子模块后级全桥电路的工作模态,可以实现光伏 DCT 高压侧电压  $U_2$ 在[ $-U_N$ ,  $U_N$ ]( $U_N$ 为 $U_2$ 的额定电压)范围内连续可调。

## 2 MPPT 控制策略

稳态运行时,光伏常通过 MPPT 控制实现出力 最大化,其控制目标是将光伏出口电压控制在附录 A图A1所示光伏特性曲线的出力峰值点。目前,常 用的 MPPT 算法有恒定电压控制法、扰动观测法、导 纳增量法等<sup>[18]</sup>,上述算法均已得到成熟应用,不是本



图2 全桥隔离电路工作状态



文研究的重点。本节主要分析由 MPPT 算法得出电 压参考值 V<sub>MPPT</sub>后,通过光伏 DCT 实现对其输出端电 压的控制。

结合第1节的光伏DCT结构,当运行于MPPT控 制模式时,所有子模块的后级全桥隔离电路均正向 投入,同时通过DAB变换器控制低压侧电压,实现 MPPT 控制。其优点在于 DAB 变换器的等效开关频 率高,控制速度快,能快速跟踪最大功率点电压的变 化。MPPT控制模式下子模块的控制框图如图3所 示。图中:Vcare为子模块高压侧电容电压平均值;  $\Delta \theta_{i}$ 为子模块 k 移相角偏差量;  $\theta_{irst}$ 为子模块 k 移相角 参考值。光伏 DCT 输入电压 Vi和电流 Li经过 MPPT 后得到电压参考值 V<sub>MPT</sub>, V<sub>1</sub>与 V<sub>MPT</sub>相减后经过比例 积分(proportional integral, PI)调节器获得参考移相 角 $\theta_{ref}$ 。为实现各子模块高压侧电容电压 $V_{cu}$ 的均 衡,在原来的控制环中叠加子模块DAB变换器高压 侧电容电压的均压环,最终通过DAB变换器的调制 策略<sup>[19]</sup>生成T<sub>1</sub> — T<sub>4</sub>、Q<sub>1</sub> — Q<sub>4</sub>的驱动信号T<sub>1</sub> — T<sub>4</sub>、  $Q_1 - Q_{40}$ 



## 3 零电压穿越策略

当正常运行时,光伏 DCT运行于 MPPT 控制模 式。当电网发生故障时,光伏 DCT 通过过流判据  $I_{set}>KI_{Nmax}$ (其中 $I_{set}$ 为故障穿越策略启动电流,应低于 全桥隔离电路 IGBT 的闭锁电流;K为可靠性系数, 推荐选取 1.2~1.3; $I_{Nmax}$ 为考虑区域极限光照强度、极 限温度条件下的最大光伏组件电流)识别故障。 故障识别后,光伏 DCT 切换至故障穿越控制策略,该策略由2个部分组成:①通过 DAB 变换器控制 每个子模块的高压侧电容维持额定电压不变;②通过 全桥隔离电路控制高压侧直流电压,快速抑制故障电 流至0。由于上述2个部分的控制相互解耦,以下将 分别介绍 DAB 变换器及全桥隔离电路的控制策略。

#### 3.1 DAB变换器控制策略

对于 DAB 变换器,其控制目标为控制子模块高 压侧电容电压 V<sub>c2</sub>为额定值。当电网发生故障时,由 于光伏 DCT 输出功率为 0,同时光伏 DCT 中有功率 输入,能量将在低压侧聚集,使得低压侧输入电压 V<sub>1</sub> 由 V<sub>MPPT</sub>开始升高。又由于光伏电池板具有附录 A 图 A1 所示的输出特性,当 V<sub>1</sub>升高至开路电压 V<sub>oc</sub>附近 时,光伏电池板输出功率与损耗功率相等,此时 V<sub>1</sub>不 再升高,DCT 继续维持不闭锁稳定运行。

DAB变换器在故障过程中具体的控制框图如图 4所示。高压侧电容电压参考值 $V_{C2ref}$ 可由高压侧直 流母线额定电压 $V_{2N}$ 和子模块数N得到,该值与DAB 变换器高压侧电容电压 $V_{C2k}$ 相减后,所得差值经过 PI调节器获得子模块移相角参考值 $\theta_{kref}$ ,然后生成 DAB变换器开关管 $T_1 - T_4$ ,Q<sub>1</sub> - Q<sub>4</sub>的驱动信号。



图4 DAB变换器故障穿越策略

Fig.4 Fault ride through strategy for DAB converter

## 3.2 全桥隔离电路控制策略

全桥隔离电路控制策略的控制目标为控制故障 发生后高压侧直流电流为0。假设 $N_1$ 为模态1下投 入(简称正向投入)子模块数, $N_2$ 为模态2下投入(简 称反向投入)子模块数。结合3.1节DAB变换器控 制策略,由于每台DAB变换器高压侧电容电压都控 制在 $V_{corr}$ ,因此存在如下关系:

$$V_{C2avg} = V_{C2ref} = V_{2N} / N \tag{1}$$

$$V_{2\rm ref} = (N_1 - N_2) V_{C2\rm avg}$$
(2)

$$N_1 + N_2 = N \tag{3}$$

式中:*V*<sub>2ref</sub>为光伏DCT输出电压参考值。联立式(2)、(3)可解得:

$$N_1 = \frac{1}{2} \left( N + \frac{V_{2\text{ref}}}{V_{C2\text{avg}}} \right) \tag{4}$$

$$N_2 = \frac{1}{2} \left( N - \frac{V_{2\text{ref}}}{V_{C2\text{avg}}} \right) \tag{5}$$

进一步,由于式(4)、(5)的计算结果可能为分数,投入子模块数需为整数,因此可采用如下2种处 理方法。

方法1:N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>均向下取整投入,剩余1个子模块 按照脉宽调制模式运行,其占空比λ如式(6)所示。

$$\lambda = \left\{ \frac{V_{2\text{ref}}}{V_{C2\text{avg}}} \right\} \tag{6}$$

式中:{·}表示取{·}的小数部分。

方法2:*N*<sub>1</sub>、*N*<sub>2</sub>采用四舍五入的方式投入,如式 (7)、(8)所示。

$$N_{1}^{*} = \left\lfloor N_{1} + \frac{1}{2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{1}{2} \left( N + \frac{V_{2\text{ref}}}{V_{C2\text{avg}}} + 1 \right) \right\rfloor$$
(7)

$$N_{2}^{*} = \left\lfloor N_{2} + \frac{1}{2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{1}{2} \left( N - \frac{V_{2\text{ref}}}{V_{C2\text{avg}}} + 1 \right) \right\rfloor$$
(8)

式中:N<sub>1</sub><sup>\*</sup>、N<sub>2</sub>分别为采用该方法下取整后的正向、反 向投入子模块数;[·]表示向下取整。应当指出,上 述2种方法对于图1所示的输出电压V<sub>2</sub>的控制效果 相同,为均匀分散开关应力,本文采用方法2进行仿 真验证。

根据上述分析,全桥隔离电路的控制框图如图 5 所示,图中 $N_{diff} = V_{2ref}/V_{C2avg}$ 。高压侧直流电流参考 值 $I_{2ref}$ 与高压侧直流电流 $I_2$ 做差后,通过PI环节输出 高压侧直流电压 $V_2$ 的参考值 $V_{2ref}$ ,再分别根据式(7)、 (8),获得正向投入子模块数 $N_1^*$ 和反向投入子模块 数 $N_2^*$ 。进一步,根据均压策略和调制策略生成全桥 隔离电路4个开关管 $S_1 - S_4$ 的驱动信号 $S_1 - S_4$ 。



#### 图5 全桥隔离电路的控制策略



当故障清除后,随着电网电压恢复,光伏DCT 中正向投入子模块逐渐增多,直至所有子模块均正 向投入。在此过程中,系统保护及故障恢复时序由 协控装置统一管理,光伏DCT接收到协控装置下发 的故障清除信号后,再次切换回 MPPT 控制模式稳 定运行,实现故障穿越。当系统保护及故障恢复未 正确动作,或协控系统故障清除信号丢失时,为避免 光伏DCT长期处于"故障穿越"状态,设定光伏DCT 在未收到协控系统故障清除信号的情况下,经过一段 特定延时t<sub>d</sub>后自行通过功率斜坡恢复供电,t<sub>a</sub>应躲过 系统的最大故障恢复时间t。若光伏DCT成功恢复 至正常运行状态,则向监控系统上输送"自动恢复成 功"信息;若在恢复过程中再次以过流判据I\_st>KI\_smax 识别故障,则光伏DCT再次进入"故障穿越"运行状 态,闭锁自动恢复功能,并向监控系统发送"尝试恢 复失败"信息,交由运行人员处理。

## 4 不同模态平滑切换策略

光伏 DCT 在故障穿越中存在2个模态切换过

程:①故障发生后,由 MPPT模式切换到零电压穿越 模式;②故障清除后,由零电压穿越模式切换到 MPPT模式。上述切换可能造成子模块暂时不均压 及暂态过压、过流等现象,危害设备的安全稳定运 行。为抑制切换过程的过应力冲击,本节研究不同 模态的平滑切换策略。

## 4.1 暂态均压控制策略

如第2、3节所述,采用MPPT控制策略时,DAB 变换器的控制中含有均压环;采用零电压穿越策略 时,DAB变换器控制各子模块高压侧电容电压相等, 均为额定值。因此,在不同运行模态达到稳态时,光 伏 DCT 均能实现子模块高压侧电容均压。但在控 制模式切换的暂态过程中,由于各子模块充放电状 态不同,高压侧电容电压存在暂时不均衡的现象。

考虑到控制模式切换对于光伏DCT本身就有 一定的冲击,如果此时各子模块暂态电压不均衡,则 将进一步恶化子模块的工作环境,严重时可能引发 设备损坏及系统失稳,因此有必要引入暂态均压控 制策略。以MPPT模式切换到零电压穿越模式为例 进行分析,设高压侧发生双极短路故障,光伏DCT 中的故障电流流通路径如附录A图A2所示。发生 故障后,故障电流由光伏DCT注入故障点,此时子 模块1为正向投入,子模块N为反向投入。由于电 感L的续流作用,此时对于正向投入的子模块N,其 并网电流 I<sub>inv</sub>为一放电电流;对于反向投入的子模块 1,其并网电流 I int 为一充电电流,因此将产生暂时电 压不均衡现象。为改善上述问题,引入基于完全排 序的电容电压均衡策略,如附录A图A3所示。首先 分别由式(7)、(8)可计算得到正、反向投入的模块数  $N_1^*, N_2^*, 然后判断输出电流 I_2$ 的方向:①当 $I_2 > 0$ (电流 从光伏 DCT 流向直流电网)时,正向投入电压最高 的N<sub>1</sub>个子模块,其余模块反向投入;②当I<sub>2</sub><0(电流 从直流电网流向光伏DCT)时,正向投入电压最低的 N<sup>\*</sup>个子模块,其余模块反向投入。

应当指出,虽然基于完全排序(即每个控制周期 均进行排序后重投)的暂态均压策略均压效果最好, 但也可能带来暂态过程中开关频率过高的问题。此 时可结合器件选型等实际情况,选用对开关频率进 行优化的均压策略,如按状态排序与增量投切的均 压策略等<sup>[20]</sup>。上述研究在MMC的均压策略中已广 泛应用,本文不再赘述。

## 4.2 模态切换后移相角初值选取

正常运行时光伏 DCT采用 MPPT 控制,能量由 低压侧传输至高压侧,即 DAB 变换器的电流方向由 低压侧流向高压侧,如附录 A 图 A2 中 I<sub>DABI</sub>、I<sub>DABI</sub>, 示。发生故障后,光伏 DCT 通过故障判据将控制模 式切换为零电压穿越模式。结合 4.1 节分析,在零电 压穿越模式下,对于正向投入的子模块N,其并网电流*I*<sub>inv</sub>为一放电电流;对于反向投入的子模块1,其并 网电流*I*<sub>inl</sub>为一充电电流。

进一步,由于控制策略刚切换的瞬间,为快速抑制故障电流 I<sub>2</sub>,几乎所有的子模块均反向投入,使得 子模块1的电容电流 I<sub>G</sub>为:

$$I_{c1} = I_{in1} + I_{DAB1}$$
(9)

由式(9)可知,*I*<sub>c1</sub>为2个充电电流的叠加,造成 子模块高压侧电压*V*<sub>c2k</sub>在暂态过程中快速升高,危害 系统安全稳定运行。为解决上述问题,考虑到在故 障穿越时,光伏DCT控制输出电流为0,从能量的角 度来看,即输出功率为0。因此本文采用在切换瞬 间,将移相角初始值*θ*<sub>kref</sub>(*t*<sub>0</sub>)置0的方式抑制电容电 压的快速升高。此时,低压侧将不向高压侧传输功 率,电感上存储的剩余能量将通过暂态均压策略由 每个子模块高压侧电容均匀吸收,同时,由于此时 DAB变换器控制策略为了控制高压侧电容电压为额 定值,这部分能量经过1个暂态过程后,最终将由 DAB变换器传递到低压侧。

基于上述分析,由 MPPT 控制切换至零电压穿 越控制时,在移相角参考值 $\theta_{kref}$ 上加入1个前馈补偿 环节,经时间t切换后移相角参考值 $\theta'_{kref}(t)$ 如式(10) 所示。

 $\theta'_{kref}(t) = \theta_{kref}(t) - \theta_{kref}(t_0^-) t \ge t_0^-$  (10) 式中: $t_0^-$ 为策略切换前时刻; $\theta_{kref}(t)$ 为经过图4所示 控制策略计算得到的移相角参考值; $\theta_{kref}(t_0^-)$ 为 $t_0^-$ 时 刻的移相角参考值。

由于电感存储的能量有限,所提策略将有效缓 解切换瞬间电容电压抬升的现象。综上所述,光伏 升压DCT的整体控制框图如附录A图A4所示。

#### 5 仿真验证

为了验证本文所提光伏 DCT 控制策略的有效 性,搭建了基于 MATLAB / Simulink 的 DC 10 kV 仿 真系统,包含1组1 MW 光伏阵列、1台1 MW 光伏 DCT 及 DC 10 kV 电网,其中光伏 DCT 含有10 个子 模块。系统拓扑结构如附录 A 图 A5、A6 所示,光伏 阵列输出特性如附录 A 图 A1 所示,仿真所用的系统 参数、DCT 无源参数及控制参数分别如附录 A 表 A1、A2 所示。

## 5.1 MPPT控制策略验证

场景1:光伏DCT处于稳态运行,初始光照强度W 为1000W/m<sup>2</sup>,0.3s时光照强度突变为1200W/m<sup>2</sup>, 验证光伏DCT的MPPT控制策略。仿真结果如图6 所示。

随着光照强度的变化,光伏DCT通过将移相角 θ由约14°增加到约16°,快速执行MPPT控制策略。 其中,光伏输出功率P由0.95 MW增大到1.14 MW,



图 0 MPPT 运行历具结未 Fig.6 Simulative results of MPPT operation

输出电流 *I*<sub>2</sub>由 92 A 增大到 110 A,输出电压 *V*<sub>1</sub>由 710 V 经过短暂波动后重新稳定在 710 V,上述参数变化与 附录 A 图 A1 中光伏电池板出力特性曲线吻合,同时 高压侧电压 *U*<sub>2</sub>在突变前、后都稳定在 10 kV,所受扰 动很小。综上所述,本文采用的 MPPT 控制策略可 快速追踪光伏电池板的最大输出功率。

#### 5.2 故障穿越策略验证

场景2:光伏DCT处于稳态运行,V<sub>MPPT</sub>为710V, 初始功率为1MW,0.3s发生出口处双极短路故障, 0.4s故障清除,系统恢复,验证光伏DCT故障穿越 策略。仿真结果如图7所示。



图 7 故障穿越仿真结果 Fig.7 Simulative results of fault ride through

在故障发生后,由于电容放电,高压侧输出电流 I<sub>2</sub>迅速上升到160 A 左右;同时高压侧电网电压跌 落,光伏 DCT 在100 μs 后通过过流判据识别故障, 控制策略从 MPPT 控制切换到故障穿越控制。此时 对于全桥隔离电路,由于故障电流很大,所有子模块 均反向投入,高压侧电压 U<sub>2</sub>变为-10 kV,以快速抑 制故障电流。随着故障电流的迅速减小,正向投入 的子模块增多,高压侧电压呈阶梯波上升,直到正负 投入的等效模块数相等,高压侧电压变为1个方波, 以控制高压侧输出电流为0。

DAB变换器的输出电压经过1个短暂的暂态过程,在20ms后被重新控制为额定电压1.01kV。在此期间,由于光伏功率无法送出,低压侧电容电压迅速上升至830V,与附录A图A1所示的开路电压吻合。此时根据光伏特性曲线,光伏电池板仅输出光伏DCT的损耗功率,因此DAB电流迅速下降,系统进入新的稳态。应当指出,当光伏最大出力能力大于系统损耗时,光伏DCT可一直保持稳定运行,因此上述策略对故障持续时间不敏感。

进一步,在0.4 s时故障清除,由于系统电压快速恢复引起反向放电,高压侧输出电流反向增大到-95 A。此时对于全桥隔离电路,为抑制反向电流,正向投入的子模块数迅速增加,高压侧电压 $U_2$ 增大。光伏DCT在5 ms后通过电压恢复、电流反向过流的复合判据识别系统恢复,控制策略从故障穿越切换到 MPPT,全桥隔离电路保持所有子模块正向投入。DAB变换器的输出电压 $V_{c2}$ 在均压环的作用下,经过约40 ms的暂态过程重新稳定在额定值1.01 kV。同时在 MPPT控制策略的作用下,光伏DCT输出电压 $V_2$ 重新追踪到710 V的 MPPT电压,光伏电池板恢复1 MW 输出功率,DAB电流 $I_{DAB}$ 及输出电压 $V_{c2}$ 恢复至额定值,系统重新进入稳态运行。

综上所述,光伏DCT实现了不闭锁穿越出口双 极短路的严重故障,同时模态切换迅速,系统运行平 稳,器件无较大的过应力冲击,在正常运行和故障工 况下,都具有良好的工作特性,验证了本文所提故障 穿越策略的可行性和有效性。

#### 5.3 平滑切换策略验证

场景3:为进一步验证本文所提平滑切换策略的有效性,在场景2的基础上,对比光伏DCT在有、 无所提平滑切换策略情况下子模块高压侧电容电压的变化情况。针对场景3,对比故障发生及故障清除时反向投入子模块1和正向投入子模块10的高压侧电容电压V<sub>c21</sub>、V<sub>c210</sub>仿真结果,如图8所示。

由图 8(a)可知:未引入平滑切换策略时,故障发 生后高压侧电容电压上升了 124 V,同时存在一定的 暂时不均压现象;引入平滑切换策略后,故障发生后 高压侧电容电压仅上升 20 V,降低了 80% 左右,且



图8 有、无平滑切换仿真对比

Fig.8 Simulation comparison between with and without smooth switching

各子模块均压状态良好。由图8(b)可知:未引入平滑 切换策略时,故障消除后高压侧电容电压上升了62 V,同时存在严重的暂时不均压现象;引入平滑切换 策略后,故障消除后高压侧电容电压上升了40V,降 低了35%左右,且各模块均压状态良好。综上所 述,本文提出的平滑切换策略可有效降低暂态过程 中的过电压现象,同时可大幅改善系统子模块间的 均压效果,提升了设备及系统运行的稳定性。

# 6 结论

本文针对中压直流系统双极故障下,光伏DCT 的低电压穿越问题,采用了一种DAB变换器加全桥 隔离电路的两级式DCT拓扑,分析并提出了实现 DCT不闭锁穿越故障的系列解决方案,包括正常运 行时MPPT控制方案、故障过程中不闭锁零电压穿 越策略及不同模态间的平滑切换策略,具有以下 优点:

1)实现了光伏DCT在双极短路的严重故障时, 保持不闭锁稳定运行;

2)上述策略对故障持续时间不敏感,且故障期 间对设备无冲击,同时在故障清除后可迅速恢复供 电,提升了供电可靠性;

3)提出的平滑切换策略可有效降低模态切换过 程中的过应力冲击,提升了设备及系统运行的稳 定性。 附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

[1] 王文蔚,王祖明. 中国能源可持续发展的途径[J]. 能源研究 与利用,2018(6):41-45.

WANG Wenwei, WANG Zuming. Ways of sustainable energy development in China[J]. Energy Research & Utilization, 2018(6):41-45.

- [2]韩民晓,谢文强,曹文远,等.中压直流配电网应用场景与系统 设计[J].电力系统自动化,2019,43(23):2-11,89.
  HAN Minxiao, XIE Wenqiang, CAO Wenyuan, et al. Application scenarios and system design of medium-voltage DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(23):2-11,89.
- [3] 贾科,李俊涛,陈金锋,等.多端口分布式光伏接入直流配电系 统整体故障穿越协调控制[J].电力自动化设备,2021,41(5): 175-182.

JIA Ke, LI Juntao, CHEN Jinfeng, et al. Integrated fault ride through control for multi-port DC distribution system with distributed photovoltaic generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5):175-182.

- [4] 刘瑞煌,杨景刚,贾勇勇,等.中压直流配电网中直流变压器工程化应用[J].电力系统自动化,2019,43(23):131-140.
   LIU Ruihuang, YANG Jinggang, JIA Yongyong, et al. Engineering applications of DC transformer in medium-voltage DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(23):131-140.
- [5] 姜淞瀚,彭克,徐丙垠,等. 直流配电系统示范工程现状与展望
  [J]. 电力自动化设备,2021,41(5):219-231.
  JIANG Songhan, PENG Ke, XU Bingyin, et al. Current situation and prospect of demonstration projects of DC distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5):219-231.
- [7] 顾浩瀚,蔡旭,李征. 基于改进型电网电压前馈的光伏电站 低电压穿越控制策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):13-19,31.

GU Haohan, CAI Xu, LI Zheng. LVRT control strategy based on improved grid-voltage feed-forward for photovoltaic station [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 13-19,31.

- [8] 欧阳森,马文杰.考虑电压故障类型的光伏逆变器低电压穿越 控制策略[J].电力自动化设备,2018,38(9):21-26.
   OUYANG Sen, MA Wenjie. Low voltage ride through control strategy of photovoltaic inverter considering voltage fault type
   [J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(9):21-26.
- [9] 王倩楠. 高压光伏直流汇集中的输入并联输出串联 DC / DC 变换器的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
   WANG Qiannan. Research on input-parallel output-series DC / DC converter applied in high voltage collection for PV generation[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2017.
- [10] 戴志辉,朱惠君,严思齐,等.光伏电站直流汇集接入系统的建模分析[J].电力自动化设备,2018,38(9):99-106.
  DAI Zhihui,ZHU Huijun,YAN Siqi,et al. Modeling and analysis of DC convergence integration system for PV power station
  [J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(9):99-106.
- [11] LIN W, JOVCIC D, NGUEFEU S, et al. Full-bridge MMC con-

verter optimal design to HVDC operational requirements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1342-1350.

 [12] 林卫星,文劲宇,刘伟增.架空柔性直流输电系统全桥模块比例设计与无闭锁控制[J].南方电网技术,2018,12(2):3-11.
 LIN Weixing, WEN Jinyu, LIU Weizeng. Full bridge sub-module proportion design and non-blocking control of overhead MMC-HVDC transmission system [J]. Southern Power System Technology,2018,12(2):3-11.

100

- [13] 康少朋.大型光伏电站直流升压汇集系统保护研究[D].北 京:华北电力大学,2018.
   KANG Shaopeng. Protection of DC step-up collection system for large scale PV stations[D]. Beijing: North China Electric
- Power University,2018.
  [14] 奚鑫泽,徐志,高尚.直流变压器光伏中压并网故障运行特性 研究[J].电力科学与技术学报,2020,35(5):89-95.
  XI Xinze, XU Zhi, GAO Shang. Fault operation of DC transformer for the PV medium voltage DC grid [J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(5):89-95.
- [15] 行登江,李道洋,王先为,等.±10kV光伏直流接入线路极间短路故障协调控制策略[J].高电压技术,2020,46(11):3847-3855.
   XING Dengjiang,LI Daoyang,WANG Xianwei, et al. Coordi-

nated control strategy for short-circuit faults of ±10 kV photovoltaic DC collection lines[J]. High Voltage Engineering, 2020,46(11):3847-3855.

[16] 耿华,刘淳,张兴,等.新能源并网发电系统的低电压穿越 [M].北京:机械工业出版社,2014.

- [17] 张中锋,谢晔源,杨晨,等. 配网直流变压器双极短路故障穿越 方法[J]. 电力工程技术,2020,39(4):16-21,41.
   ZHANG Zhongfeng,XIE Yeyuan,YANG Chen, et al. Bipolar short-circuit fault ride-through method of DC transformer[J].
   Electric Power Engineering Technology,2020,39(4):16-21,41.
- [18] 花赟昊,朱武,郭启明.光伏发电系统 MPPT 算法研究综述
  [J]. 电源技术,2020,44(12):1855-1858.
  HUA Yunhao,ZHU Wu,GUO Qiming. Review of MPPT algorithm of photovoltaic power generation system[J]. Chinese Journal of Power Sources,2020,44(12):1855-1858.
- [19] 赵彪, 宋强. 双主动全桥 DC-DC 变换器的理论和应用技术 [M]. 北京:科学出版社, 2017.
- [20] 徐政,肖晃庆,张哲任. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京:机 械工业出版社,2017:142-152.

#### 作者简介:



刘瑞煌(1992—),男,工程师,硕士,主 要研究方向为交直流配用电技术及应用 (**E-mail**:pianoboyliu@163.com);

杨景刚(1984—),男,高级工程师,硕 士,主要研究方向为交直流配用电技术及应 用(**E-mail**:huzi\_yang@163.com);

吴 舟(1992—),女,工程师,硕士,主 要研究方向为交直流配电系统保护与控制 (E-mail:satan.w.d@163.com)。

(编辑 王欣竹)

#### Photovoltaic DC transformer with non-blocking zero voltage ride through strategy

LIU Ruihuang<sup>1</sup>, YANG Jinggang<sup>1,2</sup>, WU Dan<sup>3</sup>, YAO Jinjie<sup>2</sup>, ZHANG Chenyu<sup>1</sup>, YUAN Yubo<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract**: Aiming at the low voltage ride through problem of photovoltaic direct current transformer (DCT) under bipolar fault of medium voltage direct current(MVDC) system, based on the topology structure of submodule with dual active bridge and full bridge isolated circuit, the fast implementation scheme of maximum power point tracking control during normal operation of photovoltaic DCT is analyzed. Then, based on the output characteristics of photovoltaic panels, a DCT non-blocking ride through strategy is proposed, which is insensitive to the fault duration and can realize zero voltage ride through under severe faults. Furthermore, aiming at the problem of the overvoltage and submodule voltage imbalance in the transient process of fault ride through, a smooth switching scheme among multiple control strategies is proposed to reduce the overvoltage during the transient process and improve the voltage balance effect among submodules. Finally, a simulation model is built in MATLAB / Simulink platform to verify the effectiveness of the proposed strategy. **Key words**:photovoltaic; DC transformer; zero voltage ride through; non-blocking; smooth switching





图 A2 高压侧双极短路故障示意图

Fig.A2 Schematic diagram of double pole short circuit at medium voltage side



Fig.A3 Flow chart of transient voltage sharing strategy





图 A4 光伏 DCT 整体控制框图





注: *R* 为模拟线路电阻; 系统电源电压为 10 kV,模拟并网系统,故障为系统电源两端双极金属性故障。

## 图 A5 仿真系统拓扑图

Fig.A5 Topology of simulation system



## 图 A6 仿真光伏 DCT 拓扑图

Fig.A6 Topology of simulation DCT

## 表 A1 光伏 DCT 仿真参数

Table A1 Parameters of proposed photovoltaic DCT

参数	数值	
光伏额定容量/MW	1	
光伏最大功率点电压/V	710	
光伏开路电压/V	835	
MVDC 直流母线额定电压/kV	10	
MVDC 系统等效电阻/ $\Omega$	1	

无源器件参数	数值	控制参数		数值		
DAB 模块个数	10	MPPT 控制参数	由正五拉制器	$K_{\rm p}$	0.006 7	
DAB 输出电容额定电压 V <sub>C2N</sub> /kV	1.01		电压冲压闸奋	$K_{\rm i}$	10	
DAB 输入电容值 C <sub>1</sub> /mF	1		协工环协制型	$K_{\rm p}$	0.05	
DAB 输出电容值 C <sub>2</sub> /mF	3		均压冲压闸船	$K_{\rm i}$	80	
DAB 阻尼电阻 $R_d/\mu\Omega$	1	零电压穿越控制参数	DAB 控制器	$K_p$	0.069 3	
DAB 开关频率 fs/Hz	500		(电压环)	Ki	9.9	
DAB 漏感 L <sub>k</sub> /µH	500		后级全桥控制器	$K_{\rm p}$	80	
DAB 隔直电容 C <sub>k</sub> /mF	1		(电流环)	$K_{\rm i}$	8 000	
DAB 电阻 R <sub>k</sub> /Ω	0.1					
中频变压器匝比	4:5					
高压侧限流电感 L/mH	7					

表 A2 光伏 DCT 仿真参数

Table A2 Parameters of proposed photovoltaic DCT