

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.04.003

# 配网直流变压器双极短路故障穿越方法

张中锋, 谢晔源, 杨晨, 葛健, 祁琦, 田杰

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**采用传统输入串联输出并联(ISOP)拓扑的配网直流变压器在系统发生双极短路故障时,如果不采取故障限流措施,模块电容会快速放电,故障清除后必须经过缓启充电等复杂时序完成恢复重启,无法实现故障穿越。文中提出一种基于改进型ISOP拓扑,利用故障电流阻断及限流控制实现系统故障穿越的方法。首先,理论分析了基于改进型ISOP拓扑结构的配网直流变压器系统中压侧故障穿越过程的3个阶段及其数学模型。然后,分析了基于故障限流原理的低压侧故障穿越方法及故障穿越时间的设计原则。最后,通过搭建实时数字仿真(RTDS)硬件在环半实物仿真平台进行了验证,仿真结果证明了该双极短路故障穿越方法的可行性和有效性。

**关键词:**配网直流变压器;输入串联输出并联(ISOP);双极短路;故障穿越;限流控制

**中图分类号:**TM711

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2020)04-0016-06

## 0 引言

直流配电可以减少分布式发电、储能和直流负荷接入电网的中间变换环节,可以降低电能损耗和接入成本,提高系统效率和电能质量<sup>[1-3]</sup>。配网直流变压器(direct current transformer, DCT)在直流配网中起到直流电压变换和电气隔离的作用。基于电力电子变流技术实现能量的高频变换和主动控制,其故障穿越性能对提高负荷供电可靠性至关重要<sup>[4-5]</sup>。为了满足中低压直流配网的应用需求,基于模块化输入串联输出并联(input series output parallel, ISOP)拓扑的DCT获得广泛研究和关注<sup>[6-7]</sup>。目前研究主要集中在拓扑结构设计<sup>[8-9]</sup>、稳态控制策略<sup>[10-12]</sup>、新型功率器件应用<sup>[13]</sup>等方面,而对其在直流配电网系统中的故障特性分析及故障穿越策略的研究较少。

文献[14]提出当DCT发生模块内部功率半导体故障时,可以对故障模块进行旁路处理,投入冗余模块进行故障穿越,但没有涉及直流系统外部故障的分析。文献[15]对DCT直流端口极短间路故障特性进行了分析,但是未涉及故障后系统快速恢复策略研究。文献[16]提出通过在双有源桥(dual active bridge, DAB)前级增加半桥开关管实现模块故障旁路及故障电流的阻断,但是未涉及低压侧故障穿越问题以及故障穿越过程中高、低压侧配合逻辑分析。文献[17]论述了一种低压直流端口故障下的故障穿越方法,但是此方法下低压侧模块电容会深度放电,导致基于自取能原理的模块电源板卡

掉电,重启过程缓慢。文献[18]提出了一种改变模块输入侧的串联连接方式,避免中压直流端口电容短路放电的方法,此方法由于改变连接方式,增大了器件电压应力和控制复杂度,且同样没有涉及低压侧故障穿越的方法论述。

综上所述,现有文献均未详细论述DCT中、低压两侧双极短路故障穿越的控制配合策略和快速恢复时序。文中提出一种基于改进型ISOP拓扑,采用中、低压两侧故障电流阻断及限流控制配合实现系统故障穿越的方法。最后通过搭建实时数字仿真(real-time digital simulation, RTDS)硬件在环半实物仿真平台进行了验证,仿真结果证明了文中方法的可行性和有效性。

## 1 中低压直流配用电系统中的DCT

基于传统ISOP拓扑的DCT结构如图1所示,由 $N$ 个DAB子单元高压侧串联低压侧并联组成<sup>[19]</sup>。DAB子单元主要由串联侧高压模块、中间级高频变压器和并联侧低压模块构成,高压侧模块主要由功率器件 $Q_1-Q_4$ 及母线电容 $C_H$ 构成,低压侧模块由功率器件 $Q_5-Q_8$ 及母线电容 $C_L$ 构成。 $L_r$ 为移相电感, $T_r$ 为高频变压器。通过调节高低压模块之间控制脉冲移相角实现功率控制。

图2为一种典型的中压侧手拉手状直流配用电系统<sup>[20]</sup>。两端AC/DC换流器作为中压直流系统主电源,中压直流线路通过配置一定数量的直流断路器(即 $D_1-D_7$ )实现分段运行,通过DCT实现中压直流配网和低压直流微网的连接。

对于采用图1所示传统ISOP拓扑的DCT,当系统发生短路故障时,模块电容会迅速放电,电容电

收稿日期:2020-01-13;修回日期:2020-02-25

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904700)

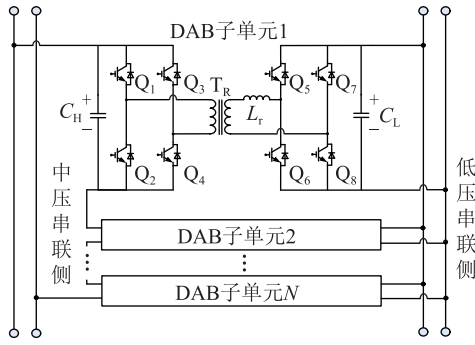


图1 基于传统 ISOP 拓扑的 DCT

Fig.1 DCT based on traditional ISOP topology

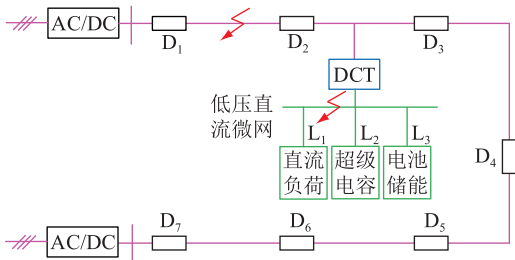


图2 中低压直流配用电系统

Fig.2 Medium and low voltage DC power distribution system

压深度跌落,必须重新经过缓启充电等复杂时序完成重启,设备不具备故障穿越能力。由此可见,DCT 双极短路故障穿越问题的本质即为采用合理的改进型拓扑及控制方法,在短路工况下锁住模块电容电压,待外部故障清除后,根据中央控制系统指令快速恢复正常运行。

文中提出一种改进型 ISOP 拓扑,如图 3 所示。在 DAB 子单元中压串联侧增加半桥电路,在低压并联出口侧增加限流模块,构成系统故障下的电容放电电阻断单元,通过两者的配合实现故障穿越。

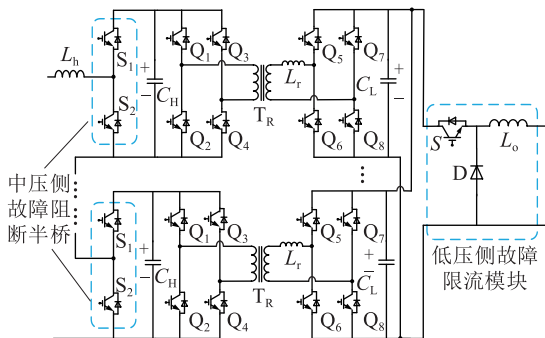


图3 基于改进型 ISOP 拓扑的 DCT

Fig.3 DCT based on improved ISOP topology

## 2 系统直流侧双极短路故障穿越

### 2.1 中压侧双极短路故障穿越

当图 3 所示系统中压配网发生故障时,故障电

流上升触发保护门槛后,DCT 中压侧的半桥阻断单元和 DAB 电路会闭锁,阻断中压侧电容的放电回路。此时,低压侧并联模块电容因失去中压配网的能量输入而又保持向低压微网能量输出,导致电压跌落。因此为了配合中压侧故障穿越,低压侧限流模块必须同时闭锁,待外部故障清除后,DCT 重新解锁恢复运行,此过程可分成以下 3 个阶段。

#### 2.1.1 闭锁前电容放电阶段

中压侧故障发生前,DAB 模块电容两端建立稳态电压。当故障发生后,在控制系统发出保护闭锁命令前,中压串联侧模块电容短路放电,由于 DAB 模块中高频变压器的电气隔离作用,影响直流端口故障特性的主要是 DAB 模块中靠近故障点的一侧,DCT 快速闭锁动作前短暂放电过程如图 4 红色通路所示,此时串联模块电容、限流电感和回路寄生电阻构成 RLC 谐振电路<sup>[21]</sup>。

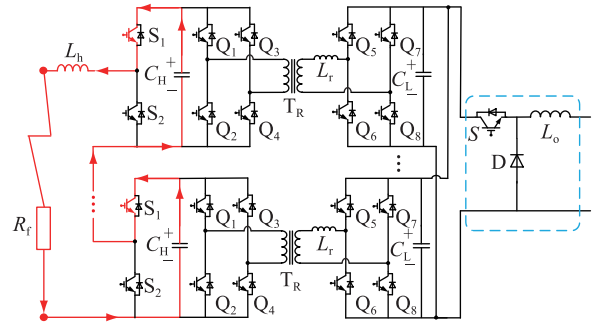


图4 DCT 中压侧短路放电回路

Fig.4 DCT discharge circuit at medium voltage side

假设故障瞬间电容电压为  $U_0$ ,直流电流为  $I_0$ 。故障后,对 RLC 回路有:

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{R_f}{L_h} \frac{du_c}{dt} + \frac{1}{L_h C_h} u_c = 0 \quad (1)$$

式中: $u_c$ 为直流电容电压; $L_h$ 为出口限流电感; $C$ 为子模块电容, $C_h = C/n$ ,为  $n$  个 DAB 单元串联电容; $R_f$ 为过渡电阻。

通常,实际系统中  $R_f$  远小于  $2\sqrt{L_h/C_h}$ ,闭锁前的电容放电过程是一个已知电路初始条件的二阶欠阻尼振荡衰减过程,则电容电压为:

$$u_c = e^{-t/\tau_1} \left[ \frac{U_0 \omega_0}{\omega_f} \sin(\omega_f t + \alpha) + \frac{I_0}{\omega_f C_h} \sin \omega_f t \right] \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} \tau_1 = 2L_h/R_f \\ \omega_0 = \sqrt{C_h/L_h} \\ \omega_f = \sqrt{\omega_0^2 - 1/\tau_1^2} \\ \alpha = \arctan \sqrt{4L_h/(C_h R_f) - 1} \end{cases} \quad (3)$$

电容放电阶段短路电流的表达式为:

$$i_{\text{short}}(t) = e^{-t/\tau_1} (U_0 \sqrt{C_h/L_h} \sin \omega_f t + I_0 \cos \omega_f t) = e^{-t/\tau_1} \sqrt{C_h U_0^2/L_h + I_0^2} \sin(\omega_f t + \beta) \quad (4)$$

其中:

$$\beta = \arctan[I_0 / (U_0 \sqrt{L_h/C_h})] \quad (5)$$

由式(4)可知,闭锁前的故障电流  $i_{\text{short}}$  主要受限流电抗  $L_h$ 、子模块串联电容  $C_h$ 、闭锁时间  $t$  等参数影响。

### 2.1.2 限流电抗经半桥下管二极管续流阶段

由 2.1.1 可知,当 DCT 闭锁后,模块电容放电通路被阻断,在较短时间内可以认为  $u_c$  近似保持不变,短路电流进入电抗续流阶段。如图 5 中蓝色通路所示,电抗电流续流通路由短路电阻和半桥下管的反并联二极管共同构成。短路电流的衰减速度主要取决于电抗取值  $L_h$ 、二极管的导通电阻  $R_{VD}$  和故障点的回路电阻  $R_f$ ,因此放电时间常数可表示为:

$$\tau = L_h / (R_f + R_{VD}) \quad (6)$$

根据 LC 电路的基本特征,电抗电流经过 4~5 个周期衰减到接近于 0 的数值。因此得到电抗续流阶段持续时间  $t_{II}$  的表达式为:

$$t_{II} = 5\tau \quad (7)$$

由式(6)可以得到电抗续流阶段短路电流为:

$$i_{\text{short}}(t) = I_{\text{short-max}} e^{-\frac{R_{VD}+R_f}{L_h} t} \quad (8)$$

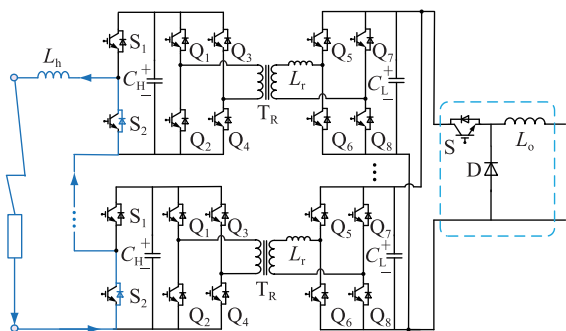


图 5 短路电流续流衰减回路

Fig.5 Short circuit current freewheeling attenuation loop

### 2.1.3 系统恢复运行

第三阶段为系统外部故障定位清除后,系统外部电源恢复,如图 6 所示,系统电源经限流电抗和半桥上管二极管的导通电阻向模块电容进行补能,表达式如下:

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{R_{VD}}{L_h} \frac{du_c}{dt} + \frac{1}{L_h C_h} u_c = \frac{1}{L_h C_h} U_{DC} \quad (9)$$

式中:  $U_{DC}$  为电压源电压。

$$u_c = u_{c(0)} + \frac{U_{DC}}{n \omega_f L_h C_h} e^{-t/\tau} \sin \omega_f t \quad (10)$$

式中:  $u_{c(0)}$  为子模块电容充电初始时刻的电压。

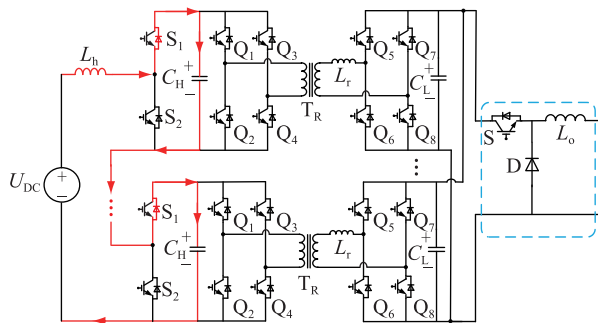


图 6 重启恢复电容补能电路

Fig.6 Capacitor compensation circuit diagram in the restart recovery process

由于系统故障恢复后,中压电网的 AC/DC 换流器往往是缓慢建压的<sup>[22]</sup>,且 DCT 设备出口配置了限流电抗器,所以补能阶段不会出现电流过冲。如果中压电网是阶跃恢复建压,为了抑制电流过冲,可以考虑输入半桥加入高频斩波工作模式进行限流。模块电容补能完成后 DCT 及低压侧限流模块即可解锁,恢复向负荷供电,完成故障穿越。

上文分析了 DCT 能量由中压侧流向低压侧时系统发生双极短路的故障穿越方法。同理,当 DCT 能量由低压侧流向中压侧,系统发生短路故障时,DCT 同样需要采取临时闭锁措施,但是此时低压限流电抗储存的能量将会充入低压侧模块电容,模块电容设计时需要满足吸收此能量后不会导致模块过压,即有:

$$\frac{1}{2} C (U_{\text{max}}^2 - U_0^2) \geq \frac{1}{2} L_o I_0^2 \quad (11)$$

式中:  $C = n C_L$  为  $n$  个 DAB 单元低压侧并联电容;  $U_{\text{max}}$  为电容过电压上限;  $U_0$  为故障初始时刻电容电压;  $L_o$  为低压侧限流电抗器;  $I_0$  为故障初始时刻流过电抗器的电流。

### 2.1.4 低压负荷不间断供电问题解决方法

由上述分析可知,在系统中压侧故障穿越过程中,由于失去了中压电网电源,DCT 采取了整机临时闭锁策略,低压负荷存在短时供电中断的问题。DCT 重新解锁恢复供电类似于交流配网里的重合闸概念,对于普通居民负荷,短时供电中断是允许的,但是对于数据中心供电等高可靠应用场景,如图 2 所示,可以在低压母线配置适当容量的超级电容和电池储能对低压负荷进行短时供电支撑,实现不间断供电。

### 2.2 低压侧双极短路故障穿越

文献[23]提出在变换器低压出口配置基于电力电子器件的固态开关,当发生短路故障时,采用

与中压侧相同的 DCT 快速闭锁策略进行故障阻断。此方法的问题是 DCT 作为低压微网的支撑电源,需要其在系统故障时,持续注入可控的短路电流,才有利于低压保护进行准确故障定位,同时用户侧基于过流脱扣原理的低压微型断路器可以过流脱扣分断,有效隔离故障点。可见,基于故障阻断控制的中压侧故障穿越方法不再适合低压侧使用。

基于此,文中提出在 DCT 低压出口配置图 7 所示故障限流模块,在低压微网馈线发生短路故障时,通过对其采用限流控制使 DCT 保持向短路故障点持续注入可控的短路电流,而不是简单的闭锁阻断。图 7 中, $C_o$ 为 DCT 低压侧模块并联等效输出电容;开关管 S 和二极管 D 构成一个限流功率单元。

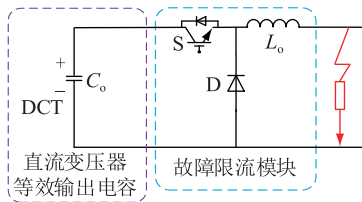


图 7 低压侧故障限流原理

Fig.7 Fault current limiting schematic at low-voltage side

正常工作时,S 始终导通,D 因承受反压处于截止状态。发生馈线短路故障后,限流控制工作过程如下:

(1) 短路发生后,故障电流上升,电容能量转移至限流电抗,此过程电路为 RLC 二阶放电电路,当电流上升到限流值上限时,S 关断;

(2) S 关断后,故障电流在限流电抗  $L_o$  中经 D 和过渡电阻形成续流衰减回路,当电流衰减至限流值下限时,S 再次开通,电流开始上升,重复以上过程。此过程中 DCT 输出电流被控制在限流值上下限之间,DCT 低压侧模块电容电压亦得到保持;

(3) 故障点清除后,DCT 输出电流不会再上升到限流值上限,S 会自然恢复至始终导通的正常工作状态,完成故障穿越。

上述故障穿越过程中,故障穿越的时间要求依据低压断路器的过流脱扣分断时间而定。目前工业界开发的低压直流断路器的脱扣分断时间一般在数十毫秒,故障限流时间要求大于低压直流断路器的过流脱扣时间。此外,低压故障穿越期间,DCT 输出电容电压不会出现跌落,DAB 电路不需要闭锁,经过 DCT 的有效隔离,低压微网侧故障特征不会传递至中压配网侧。对于实际工程中应用的大容量直流变压器,以容量 1 MW,±10 kV/750 V 的 DCT 为例,低压侧额定电流为 1 334 A,需要配置具备大电流通流能力的故障限流模块,可以采用图 8

所示多路并联的工程方案,通过交错工作,有效减小注入故障的电流纹波。

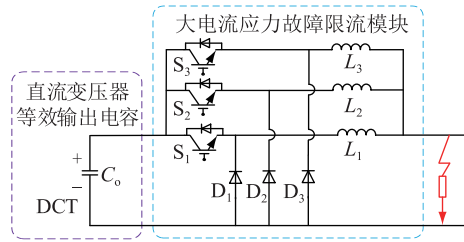


图 8 大电流应力下故障限流模块工程应用方案

Fig.8 Engineering application scheme of fault current limiting module under high current stress

### 3 仿真验证

#### 3.1 仿真模型及参数

为验证文中故障穿越方法的可行性和有效性,搭建了 DCT 的 RTDS 硬件在环半实物仿真模型。系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Table 1 Engineering prototype system parameters

参数	数值
中压侧直流母线电压 $V_H$ /kV	±10
低压侧直流母线电压 $V_L$ /kV	0.75
额定容量 $P$ /kW	500
高压侧电流/A	25
低压侧电流/A	667
子单元个数	30
中压侧串联子模块额定电压/V	667
中压直流端口等效电容/ $\mu$ F	38
中压直流端口故障限流电抗/mH	6
低压直流端口等效电容/mF	15
低压直流端口故障限流电抗/mH	1.6

#### 3.2 仿真结果

##### 3.2.1 中压侧双极短路故障穿越仿真

第一阶段半桥闭锁前电容放电:如图 9 所示,中压侧系统发生故障后,±10 kV 极线电压跌落至 0,串联模块电容经限流电抗放电,电流由故障前额定运行 25 A 迅速上升至约 300 A,触发过流保护动作,DCT 闭锁,从故障发生至保护闭锁时刻,子模块电容电压跌落至约 610 V。

第二阶段限流电抗经半桥下管二极管续流:此阶段短路电流进入 LR 衰减续流阶段,经过 35 ms 衰减至 0,此阶段过程中由于阻断单元已闭锁,子模块电容能量被保持,只在均压电阻上存在很小的损耗,子模块电容电压基本保持不变。

第三阶段系统恢复运行:仿真设置系统外部故

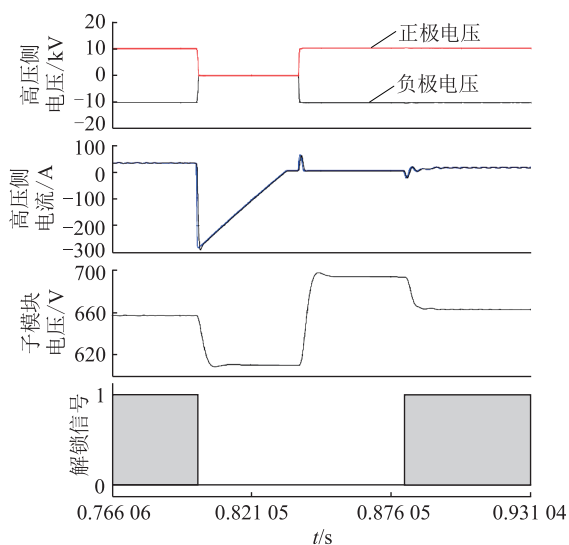


图9 中压侧故障穿越仿真波形

Fig.9 Short-circuit fault ride-through simulation waveform at Medium voltage side

障发生 40 ms 后,故障点清除,中压 AC/DC±10 kV 电源恢复,电源经限流电抗和半桥上管二极管向模块电容进行补能,补能完成后子模块电容电压上升至 694 V,略高于子模块额定运行时的 667 V 额定电压,是由限流电抗在补能阶段储存的能量通过半桥上管二极管单向转移至模块电容所致,等 DCT 模块电容补能完成后通知上层故障快速恢复系统,由上层故障快速恢复系统下发 DCT 解锁命令,解锁后子模块电压恢复至 667 V 额定运行电压。

### 3.2.2 低压侧双极短路故障穿越仿真

图 10 为低压侧故障穿越期间限流模块的工作波形。

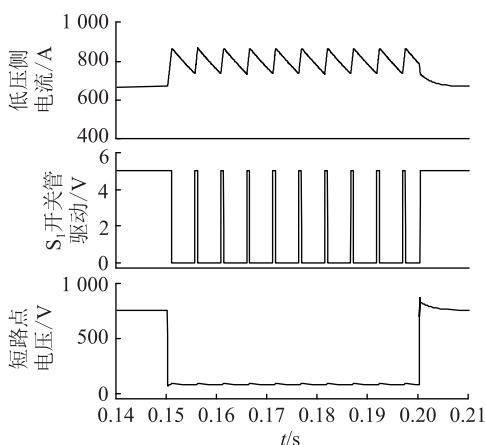


图10 低压侧故障穿越仿真波形

Fig.10 Short-circuit fault ride-through simulation waveform at low voltage side

图 10 正常工作时, S 始终开通, 输出电流。在 0.15 s 时低压侧线路发生短路故障, 通过 S<sub>1</sub> 开通和关断, 将故障电流控制在上下限之间, 滞环控制电

流在低压侧短路点过渡电阻产生约 15 V 的电压纹波脉动。仿真算例中 DCT 低压侧额定电流 667 A, 将故障电流限制在 734~867 A (1.1~1.3 p.u.) 之间, 故障穿越期间平均电流 800 A (1.2 p.u.), 此阶段 DCT 等效处于暂时性过流运行工况, 仿真故障穿越时间设置为 50 ms, 故障清除后, 低压侧电流自然回归到正常工作水平, 完成故障穿越。

## 4 结论

文中针对基于传统 ISOP 拓扑的配网直流变压器不具备双极短路故障穿越能力的问题, 提出了一种基于改进型 ISOP 拓扑, 利用故障电流阻断及限流控制实现配网直流变压器中压侧和低压侧双极短路故障穿越的方法。通过搭建 RTDS 硬件在环半实物仿真平台, 验证了文中故障穿越方法的有效性和可行性, 为提高直流变压器设备在直流配电系统中的运行可靠性提供了依据。

### 参考文献:

- [1] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.  
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.
- [2] 于立杰, 董沛毅. 多端柔性直流配电网运行策略优化研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(9): 72-78.  
YU Lijie, DONG Peiyi. Operation strategy optimization of multi-terminal flexible DC distribution network[J]. Smart Power, 2018, 46(9): 72-78.
- [3] 魏恩伟, 张之涵, 李伟华, 等. 基于柔性直流技术的智能电网配电系统电压稳定性分析[J]. 智慧电力, 2019, 47(10): 99-103.  
WEI Enwei, ZHANG Zhihan, LI Weihua, et al. Voltage stability analysis in intelligent power distribution system based on VSC-HVDC[J]. Smart Power, 2019, 47(10): 99-103.
- [4] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波. 基于 MMC 的环状直流配网在不同接地方式下的故障特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 1-10.  
DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo. Analysis on fault characteristics of MMC-based ring DC distribution networks under different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 1-10.
- [5] GUILLOD T, HUBER J E, FRANCK C M, et al. Characterization of the voltage and electric field stresses in multi-cell solid-state transformers[C]//ECCE 2014. IEEE, 2014.
- [6] 赵彪, 宋强, 刘文华, 等. 用于柔性直流配电的高频链直流固态变压器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4285-4303.  
ZHAO Biao, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. High-frequency chain DC solid state transformer for flexible DC power distribu-

- tion[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25):4285-4303.
- [7] WANG Dan, TIAN Jie, MAO Chengxiong, et al. A 10 kV/400 V 500 kV·A electronic power transformer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(11):6653-6663.
- [8] BIFARETTI S, ZANCHETTA P, WATSON A A, et al. Advanced power electronic conversion and control system for universal and flexible power management[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2):231-243.
- [9] COSTA L F, BUTICCHI G, LISERRE M. Quad-active bridge DC-DC converter as cross-link for medium-voltage modular inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(2):1243-1253.
- [10] 刘教民, 孙玉巍, 李永刚, 等. 级联式电力电子变压器混合脉宽调制谐波分析及均衡控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7):101-107.
- LIU Jiaomin, SUN Yuwei, LI Yonggang, et al. Harmonic analysis and balancing control of cascade power electronic transformer based on hybrid pulse width modulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7):101-107.
- [11] LIU Jianqiang, YANG Jingxi, ZHANG Jiepin, et al. Voltage balance control based on dual active bridge DC/DC converters in a power electronic traction transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2):1696-1714.
- [12] 舒良才, 陈武, 王琛, 等. 基于混频调制的新型电力电子变压器[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7):146-152.
- SHU Liangcai, CHEN Wu, WANG Chen, et al. Power electronic transformer based on mixed-frequency modulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7):146-152.
- [13] WANG L, ZHU Q, YU W, et al. A medium-voltage medium-frequency isolated DC-DC converter based on 15 kV SiC MOSFETs[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1):100-109.
- [14] 徐永海, 周廷冬. 功率开关故障情况下 MMC 型电力电子变压器的故障穿越运行策略[J]. 南方电网技术, 2017, 11(8):16-24.
- XU Yonghai, ZHOU Tingdong. Fault ride-through strategy for MMC based power electronic transformer considering power switches failures[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(8):16-24.
- [15] 姜山, 范春菊, 黄宁, 等. 电力电子变压器直流端口极间短路故障特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5):1301-1309.
- JIANG Shan, FAN Chunju, HUANG Ning, et al. Fault characteristic analysis of DC pole-to-pole fault in power electronic transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5):1301-1309.
- [16] 李建国, 赵彪, 宋强, 等. 适用于中压直流配网的多电平直流链固态变压器[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14):3717-3725.
- LI Jianguo, ZHAO Biao, SONG Qiang, et al. DC solid state transformer based on multilevel DC link for medium-voltage DC distribution application[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14):3717-3725.
- [17] XIE Ren, LI Hui. Fault performance comparison study of a dual active bridge (DAB) converter and an isolated modular multilevel DC/DC (iM2DC) converter for power conversion module application in a breaker-less shipboard MVDC system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5):5444-5455.
- [18] 马大俊, 陈武, 薛晨炆, 等. 低压直流母线 AC-DC 电力电子变压器及其短路故障穿越方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8):158-166.
- MA Dajun, CHEN Wu, XUE Chenyang, et al. AC-DC power electronic transformer with low-voltage DC bus and strategy of short-circuit fault ride-through[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8):158-166.
- [19] YU X, SHE X, ZHOU X, et al. Power management for DC microgrid enabled by solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2):954-965.
- [20] 熊雄, 季宇, 李蕊, 等. 直流配用电系统关键技术及应用示范综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23):6802-6813, 7115.
- XIONG Xiong, JI Yu, LI Rui, et al. An overview of key technology and demonstration application of DC distribution and consumption system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23):6802-6813, 7115.
- [21] 朱铭炼, 姜田贵, 欧阳有鹏, 等. 模块化多电平换流器直流双极短路故障耐受能力研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2):44-48.
- ZHU Minglian, JIANG Tianguai, OUYANG Youpeng, et al. Current distribution and junction temperature calculation of protective thyristor for MMC valve[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2):44-48.
- [22] 吕家乐, 吴在军, 窦晓波, 等. 基于 MMC 的中压直流配电网极间短路故障保护策略[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4):2-9.
- LYU Jiale, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. Bipolar short-circuit fault protection strategy of medium-voltage DC distribution network based on MMC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4):2-9.
- [23] KONG L, NIAN H. Collaborative control strategy of power electronic transformer and fault current limiter in DC microgrid[J]. The Journal of Engineering, 2009, 1(1):1788-1792.

#### 作者简介:



张中锋

张中锋(1988),男,硕士,工程师,从事配网直流变压器相关工作(E-mail: zhangzhongfeng@nrec.com);

谢晔源(1978),男,硕士,教授级高级工程师,从事柔性交直流输电及大功率电力电子交流技术相关工作;

杨晨(1985),男,博士,工程师,从事配网直流变压器相关工作。

(下转第 41 页)

## Reflection and analysis for oscillation of the blackout event of 9 August 2019 in UK

FAN Chen<sup>1</sup>, YAO Jianguo<sup>1</sup>, ZHANG Qibin<sup>2</sup>, XU Chunlei<sup>2</sup>, REN Hui<sup>1</sup>, DOU Renhui<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

**Abstract:** On 9 August 2019, a major power blackout occurred in the great Britain power grid, causing power outage in some cities including London, and affected about 1 million people. It is necessary to find the reason to provide reference for the grid operation of China. The accident is summarized and the oscillation in the wind farm is discussed in detail. The reflection and analysis about the oscillation is presented considering the serial oscillation event, including typical characteristic and remaining problems. The new characteristic of oscillation about power grid which connected a large scale renewable plants is described, the shortcoming of wide area measurement system (WAMS) is demonstrated, and a new method of real-time monitoring of oscillation based on wide-frequency measurement is presented. The scheme about implement provides new method for operation and supervisory of power electronics dominated power system and improves the security and stability of future grid.

**Keywords:** blackout; oscillation of power grid; real-time supervisor; power electronics dominated power system; wide-frequency measurement

(编辑 吴楠)

(上接第 21 页)

## Bipolar short-circuit fault ride-through method of DC transformer

ZHANG Zhongfeng, XIE Yeyuan, YANG Chen, GE Jian, QI Qi, TIAN Jie

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** When the DC transformer based on the traditional input series output parallel (ISOP) topology has a bipolar short-circuit fault, the module capacitors discharge quickly if no fault current limiting measures are taken. After the fault is cleared, it must be recovered by complicated timing such as slow start charging failed to fault ride-through. A method based on improved ISOP topology, using fault current blocking and current limiting control to realize system bipolar short-circuit fault ride-through is proposed. Firstly, the three stages and the mathematical models of the DC-voltage electronic transformer based on the improved ISOP topology are analyzed. Then, the low-voltage side fault ride-through method based on fault current limiting principle and the design principle of fault ride-through time are analyzed. Finally, the RTDS is built on the hardware-in-the-loop simulation platform. The results demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed fault traversal method.

**Keywords:** DC transformer; input series output parallel (ISOP); bipolar short-circuit fault; fault ride-through; current limit control

(编辑 方晶)