

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181417

# 多端口级联式电力电子变压器可靠性评估模型及其应用

杨汾艳<sup>1</sup>, 李海波<sup>2</sup>, 盛超<sup>1</sup>, 黄辉<sup>1</sup>, 熊天龙<sup>2</sup>, 张小卉<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610042)

**摘要:** 多端口级联式电力电子变压器(Power Electronic Transformer, PET)是未来实现多电压等级、交直流混联形态配电网的核心设备,其可靠性对于配电网可靠性水平影响较大。首先分析了多端口级联式PET典型拓扑结构及工作原理。其次基于工程可靠性原理研究建立了考虑器件冗余的PET可靠性评估模型。然后分析了PET对交直流混合配电网可靠性的影响。最后针对某“手拉手”结构交直流混合配电网进行算例分析。计算了PET不同设计模式、冗余度下的可靠性水平。进行了PET对交直流混合配电系统可靠性的影响及其灵敏度分析,验证了所提算法的正确性和有效性。

**关键词:** 多端口级联式; 电力电子变压器; 交直流混合配电网; 可靠性评估; 器件冗余

## Reliability evaluation model of cascaded multiport power electronic transformer and its application

YANG Fenyan<sup>1</sup>, LI Haibo<sup>2</sup>, SHENG Chao<sup>1</sup>, HUANG Hui<sup>1</sup>, XIONG Tianlong<sup>2</sup>, ZHANG Xiaohui<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;

2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610042, China)

**Abstract:** The cascaded multiport Power Electronic Transformer (PET) is a key equipment for future distribution grid with multi-voltage level and AC/DC hybrid feature, whose reliability has significant effect on the distribution grid reliability level. First, the typical topological structure and working principle of cascaded multiport PET are analyzed. Secondly, the reliability evaluation model for PET considering the device redundancy is established based on the engineering reliability theory. Then the effect of cascaded multiport PET on the AC/DC hybrid distribution network reliability is analyzed. Finally, the case studies are provided with a ‘hand in hand’ AC/DC hybrid power distribution network structure. The PET reliability levels under different design patterns and the redundancy levels are calculated. The influence of PET on reliability of AC/DC hybrid distribution system and its sensitivity analysis are carried out, which verifies the correctness and validity of the proposed algorithm.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. GDKJQQ20161200).

**Key words:** cascaded multiport; power electronic transformer; AC/DC hybrid distribution network; reliability evaluation; device redundancy

## 0 引言

相比交流系统,直流系统具有供电容量高、供电半径大、潮流可控及损耗低等优点<sup>[1-4]</sup>,适合可再生能源、电动汽车等直流电源或负荷直接接入,减少变流环节。随着电力电子技术的迅速发展和成熟应用,诸多学者提出直流配电网的概念<sup>[5]</sup>解决交流

电网存在的潮流控制、无功补偿、供电半径不足及网损率高等问题。因此,随着可再生能源、直流负荷的日益增长,直流配电网成为未来配电网形态发展的热点方向之一。

直流配电网的可靠性水平对于其能否顺利推广和快速发展具有重要意义,也是目前工业和学术界争议的热点问题。目前,已有学者针对这一问题开展了研究。文献[6]表明,由于直流断路器和直流变压器的高故障率,目前柔性直流配电网可靠性低于交流配电网,随着电力电子器件可靠性水平的提升,

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目资助 (GDKJQQ20161200)

直流配电网可靠性将接近并超越交流配电网。文献[7]则认为针对数据中心,直流配电系统的可靠性高于交流系统。文献[8]建立了电压源型换流器、直流变压器和直流断路器的可靠性模型,并研究器件冗余对直流配电网可靠性的影响,研究表明设备级冗余比器件级冗余更能有效地提高系统的可靠性。文献[9]基于交直流混合微电网的分布式电源和需求侧资源,提出了基于灵活资源的可靠性指标。文献[10]研究了含电力电子变电站的配电网可靠性评估方法,但未涉及电力电子器件电路结构及其可靠性分析。

根据研究,未来配电网将呈现多电压等级、交直流混联的形态,而多端口级联式的电力电子变压器(Power Electronic Transformer, PET)是实现这一形态的核心设备<sup>[11-12]</sup>。PET自提出以来受到了众多学者的关注,目前的研究主要侧重于其拓扑结构、控制策略、稳态建模等方面<sup>[13-15]</sup>,而鲜有关于PET可靠性建模方面的研究。作为联系交、直流配电网及多个电压等级的核心枢纽,PET的可靠性对于整个交直流配电系统可靠性具有重要意义,因此亟需结合PET的典型拓扑结构,建立其可靠性模型,并将其纳入交直流配电系统可靠性评估中。

本文在现有交直流配电网可靠性评估理论<sup>[5]</sup>的基础上,分析了多端口级联式PET的工作原理,结合其典型拓扑结构和不同设计模式,基于 $k/n(G)$ 理论建立了考虑电力电子器件冗余的PET可靠性评估模型。在PET设备可靠性建模层面,分别建立了整体设计模式和独立设计模式的可靠性模型,研究了考虑冗余设计下的设备故障率计算方法。在系统可靠性分析层面,结合配电网可靠性评估模型和需求,将转化后的PET可靠性模型纳入交直流配电网可靠性评估模型中,重点分析了PET不同设计模式、不同冗余水平对直流系统可靠性的影响,并对比了不同场景下直流系统与交流系统的可靠性水平。

### 1 多端口级联式PET结构及运行原理

多端口级联式电力电子变压器的拓扑结构如图1所示<sup>[11]</sup>,共包括3个部分。最左侧MMC拓扑结构实现10 kV交流向±10 kV直流转换,每相由上下桥臂构成,每个桥臂由 $n$ 个子模块及桥臂电感 $L_m$ 串联组成,MMC子模块一般采用半桥、全桥或双箱位型结构<sup>[16]</sup>,不同拓扑子模块包含的元件数量如表1所示。

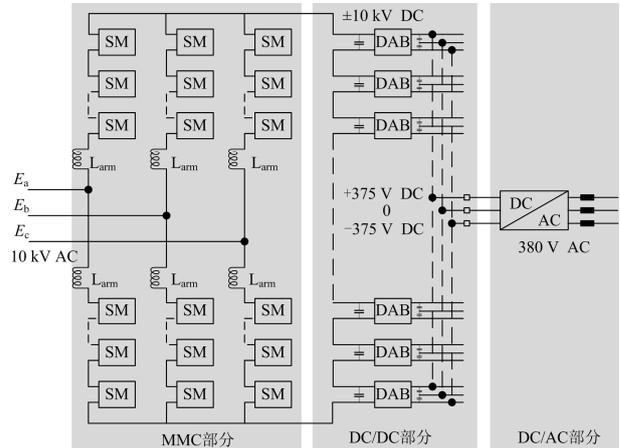


图1 多端口级联式电力电子变压器拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of cascaded multiport PET

表1 子模块元件数量

Table 1 Component number of submodules

子模块类型	IGBT 数量	二极管数量	电容数量
半桥子模块	2	2	1
全桥子模块	4	4	1
双箱位型子模块	5	7	2

采用全桥和混合结构的电力电子变压器具有故障清除能力,但是成本和损耗较高;半桥由于结构简单、成本较低等优势,在实际工程中获得广泛应用。因此,本文电力电子变压器以半桥结构进行可靠性建模分析。实际工程中为了提高MMC的可靠性,一般采用子模块冗余配置的原则<sup>[17]</sup>。

电力电子变压器中间部分为直流变压器DC/DC环节,实现±10 kV直流向±375 V直流的转化。考虑到电压变比较高,采用输入串联输出并联型拓扑结构。每一个子模块采用双主动桥(Dual Active Bridge, DAB)拓扑结构<sup>[18]</sup>,由高压侧电容、逆变电路、高频交流变压器、整流电路和低压侧电容构成,其拓扑结构如图2所示。同理,为了提高DC/DC部分的可靠性,实际中一般对DAB模块进行冗余配置。

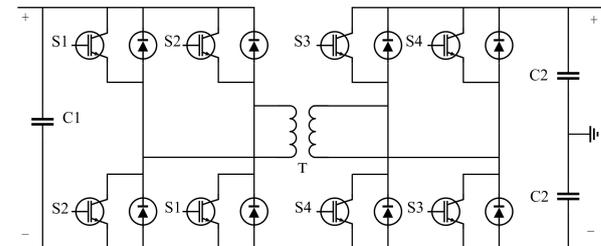


图2 双主动桥DAB子模块拓扑结构

Fig. 2 Topological structure of DAB submodule

±375 V 直流通过逆变器 DC/AC, 可以转化为 380 V 三相交流, 为传统交流负载供电。图 1 所示的电力电子变压器结构实现了多端口(交流 10 kV 及 380 V、直流±10 kV 及±375 V)电压互联, 采用多级联形式实现了大容量、高电压变比等特征, 并具有能量双向流动可控的优点。

## 2 PET 可靠性建模

本节基于电力电子变压器拓扑结构及工作原理, 建立其可靠性评估模型。考虑两类不同的电力电子变压器设计模式: 模式 1 将其作为一个整体设计, 任何模块出现故障, 整个系统均发生停运; 模式 2 采用独立设计, 即任意模块故障不会影响其他模块正常工作。基于电力系统可靠性原理<sup>[19]</sup>, 在交直流混联配电系统可靠性分析中, 上述不同设计模式可等效为不同的可靠性模型, 如图 3 所示。

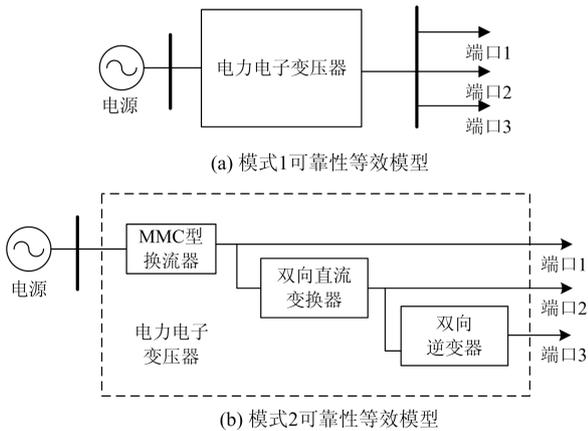


图 3 电力电子变压器可靠性等效模型  
Fig. 3 Equivalent reliability model of PET

针对配电系统可靠性评估需求, 需要得到各个模块的故障率及修复时间指标, 记为  $\lambda_i$  及  $r_i$ , 其中  $i \in \Omega, \Omega = \{MMC, DC/DC, DC/AC\}$ 。以下基于工程可靠性原理, 分别针对上述 2 种设计模式进行可靠性建模分析。

### 2.1 模式 1 可靠性建模

基于模式 1 特点, 电力电子变压器可靠性模型由 MMC 结构、DC/DC 结构和 DC/AC 结构组合而成, 其中 MMC 由包含多个子模块的三相桥臂构成, DC/DC 由多个 DAB 单元构成。除此之外, 系统安全可靠运行还与控制保护系统、阀冷系统可靠性有关<sup>[20]</sup>。因此, 基于模式 1 的电力电子变压器可靠性模型组合关系如图 4 所示。

首先对 MMC 模块子模块进行可靠性建模。以半桥子模块为例, 包含 2 个反并联二极管 IGBT、

驱动电路、电容器及充电电源等。任意元件发生故障, 子模块均会故障, 因此其可靠性评价模型如图 5 所示。

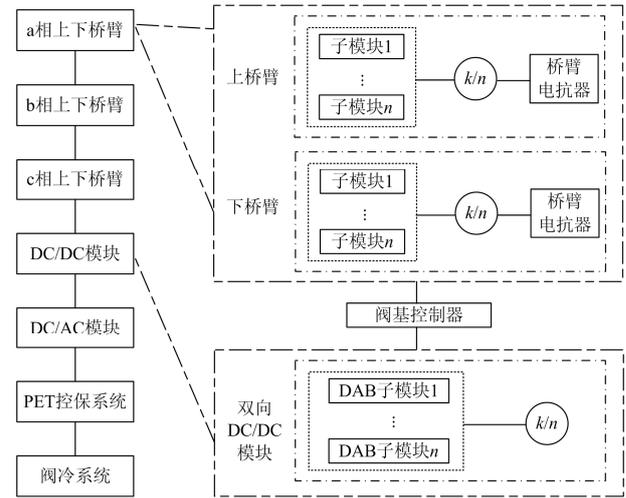


图 4 电力电子变压器可靠性模型评价模型  
Fig. 4 Reliability evaluation model of PET



图 5 MMC 子模块可靠性评价模型

Fig. 5 Reliability evaluation model of MMC submodule

根据可靠性原理, MMC 半桥子模块的可靠度函数如式(1)所示。

$$R_{SM}(t) = [R_{IGBT}(t)]^2 R_C(t) R_{PS}(t) R_{SC}(t) \quad (1)$$

式中,  $R_{IGBT}(t)$ 、 $R_C(t)$ 、 $R_{PS}(t)$ 、 $R_{SC}(t)$  分别为 IGBT、电容器、充电电源和驱动电路的可靠度函数。

假设每个桥臂由  $n_M$  个子模块构成, 且考虑冗余, 即当不少于  $k_M$  个子模块正常工作时, 桥臂阀串能够正常工作; 当有超过  $n_M - k_M$  个子模块故障时, 桥臂阀串故障。采用  $n$  中取  $k$  表决系统的可靠性评估模型来评估桥臂阀串可靠性<sup>[21]</sup>, 并考虑桥臂电抗器的可靠度, 则单相桥臂的可靠度函数如式(2)所示。

$$R_{am}(t) = R_L(t) \sum_{i=k_M}^{n_M} \binom{n}{i} [R_{SM}(t)]^i [1 - R_{SM}(t)]^{n_M-i} \quad (2)$$

考虑阀基控制器的可靠度函数为  $R_{bc}(t)$ , 则三相 MMC 部分的可靠度函数为

$$R_{MMC}(t) = [R_{am}(t) R_{bc}(t)]^3 \quad (3)$$

直流变压器部分由  $n_D$  个 DAB 模块构成<sup>[22]</sup>, 同样考虑冗余, 即当不少于  $k_D$  个 DAB 模块正常工作时, 直流变压器部分能够正常工作; 当有超过  $n_D - k_D$  个 DAB 模块故障时, 直流变压器部分故障。基于  $k/n(G)$  系统可靠性评估模型, 可以得到直流变压器部分可靠度函数计算公式为

$$R_{\text{DCDC}}(t) = \sum_{i=k_D}^{n_D} \binom{n}{i} [R_{\text{DAB}}(t)]^i [1 - R_{\text{DAB}}(t)]^{n_D-i} \quad (4)$$

式中,  $R_{\text{DAB}}(t)$  为 DAB 子模块可靠度函数。由图 2 可知, 每个 DAB 模块包括高压侧电容、逆变电路、原边电感、高频变压器、整流电路、低压侧电容, 因此其可靠性评价模型如图 6 所示, 可靠度函数计算如式(5)所示。

$$R_{\text{DAB}}(t) = R_{\text{C}_1}(t)R_{\text{DCAC}}(t)R_{\text{L}}(t)R_{\text{T}}(t)R_{\text{ACDC}}(t)R_{\text{C}_2}(t) \quad (5)$$



图 6 DAB 模块可靠性评价模型

Fig. 6 Reliability evaluation diagram of DAB module

记 ±375 V 直流向 380 V 三相交流转化的逆变器可靠度函数为  $R_{\text{DCAC}}^*(t)$ , 电力电子变压器控保系统、阀冷系统可靠度函数分别为  $R_{\text{CP}}(t)$ 、 $R_{\text{CS}}(t)$ , 则电力电子变压器可靠度函数与平均无故障时间分别如式(6)、式(7)所示。

$$R_{\text{PET}}(t) = R_{\text{MMC}}(t)R_{\text{DCDC}}(t)R_{\text{DCAC}}^*(t)R_{\text{CP}}(t)R_{\text{CS}}(t) \quad (6)$$

$$MTTF_{\text{PET}} = \int_0^{+\infty} R_{\text{PET}}(t) dt \quad (7)$$

配电系统可靠性评估中需要掌握各类设备的故障率及修复时间参数。假设所有元件寿命服从指数分布, 即可靠度函数为  $e^{-\lambda t}$ , 其中  $\lambda$  为故障率。根据可靠性原理可知, 串联系统故障率为各元件故障率之和, 因此关键问题是求取  $k/n(G)$  系统的故障率。以 MMC 系统为例, 假设 SM 子模块可靠度函数为  $e^{-\lambda_{\text{SM}} t}$ , 则 MMC 单个桥臂阀串的平均无故障时间为

$$MTTF_{\text{MMC}} = \int_0^{+\infty} \sum_{i=k_M}^{n_M} \binom{n}{i} e^{-i\lambda_{\text{SM}} t} [1 - e^{-\lambda_{\text{SM}} t}]^{n_M-i} dt = \sum_{i=k_M}^{n_M} \frac{1}{\lambda_{\text{SM}} i} \quad (8)$$

即单个 MMC 桥臂故障率为

$$\lambda_{\text{MMC-arm}} = \frac{1}{MTTF_{\text{MMC}}} = \lambda_{\text{SM}} / \sum_{i=k_M}^{n_M} \frac{1}{i} \quad (9)$$

综上, 基于可靠性串联原理, 可以得到电力电子变压器全系统故障率如式(10)所示。根据目前的可靠性理论, 难以对电力电子变压器的修复时间进行预测, 但在实际电力系统中, 设备故障后一般采用更换方式, 因此修复时间可以参考相近电压等级交流变压器的更换时间。

$$\lambda_{\text{PET}} = 3\lambda_{\text{arm}} + 3\lambda_{\text{bc}} + \lambda_{\text{DCDC}} + \lambda_{\text{DCAC}}^* + \lambda_{\text{CP}} + \lambda_{\text{CS}} = 3\lambda_{\text{L}} + \frac{3\lambda_{\text{SM}}}{\sum_{i=k_M}^{n_M} \frac{1}{i}} + 3\lambda_{\text{bc}} + \frac{\lambda_{\text{DAB}}}{\sum_{i=k_D}^{n_D} \frac{1}{i}} + \lambda_{\text{DCAC}}^* + \lambda_{\text{CP}} + \lambda_{\text{CS}} \quad (10)$$

式中:  $\lambda_{\text{L}}$ 、 $\lambda_{\text{SM}}$ 、 $\lambda_{\text{bc}}$ 、 $\lambda_{\text{DAB}}$ 、 $\lambda_{\text{DCAC}}^*$ 、 $\lambda_{\text{CP}}$ 、 $\lambda_{\text{CS}}$  分别为桥臂电抗器、MMC 子模块、阀基控制器、DAB 子模块、DCAC 变换器、电力电子变压器控保系统、阀冷系统的故障率。

## 2.2 模式 2 可靠性建模

模式 2 认为电力电子变压器内部任一模块的故障不会引起其他模块失效。例如 DC/DC 模块故障, 不会影响 MMC 模块工作, ±10 kV 直流系统仍正常运行。针对模式 2, 需要分别计算各模块的可靠性参数, 然后采用图 3(b)的可靠性模型进行配电网可靠性评估。

模式 1 研究中给出了 MMC、DC/DC 及 DC/AC 等模块的可靠度函数计算方法。在模式 2 中, 各模块可靠性模型等于模式 1 中对应模块与控保系统、阀冷系统串联; 以 MMC 模块为例, 其可靠性评价模型如图 7 所示。



图 7 模式 2 中 MMC 模块可靠性评价模型

Fig. 7 Reliability evaluation model of MMC module in type 2

因此, 各模块故障率参数计算如式(11)所示。

$$\begin{cases} \lambda_{\text{MMC}} = 3\lambda_{\text{L}} + \frac{3\lambda_{\text{SM}}}{\sum_{i=k_M}^{n_M} \frac{1}{i}} + 3\lambda_{\text{bc}} + \lambda_{\text{CP}} + \lambda_{\text{CS}} \\ \lambda_{\text{DCDC}} = \frac{\lambda_{\text{DAB}}}{\sum_{i=k_D}^{n_D} \frac{1}{i}} + \lambda_{\text{CP}} + \lambda_{\text{CS}}, \lambda_{\text{DCAC}} = \lambda_{\text{DCAC}}^* \end{cases} \quad (11)$$

## 3 电力电子变压器对交直流混合配电网可靠性评估的影响

### 3.1 配电网可靠性评估算法及指标

配电网可靠性评估常采用解析法<sup>[23]</sup>和蒙特卡罗模拟法<sup>[24]</sup>。模拟法具有不依赖于系统规模、计算简单等优点, 但是计算结果存在不确定性、收敛速度慢等缺点。最小割集法是配电网中常用的可靠性评价方法, 具有计算速度快的优点。本文采用最小割集法对含电力电子变压器的交直流混合配电网可靠性进行评估。

在配电网可靠性评估中, 假设电源点至负荷点  $L_i$  存在一条或多条供电路径, 当移除网络中多个元件使得负荷点  $L_i$  停电, 且放回其中任一元件负荷点即可恢复供电时, 这些元件构成的集合即称为负荷点  $L_i$  的最小割集<sup>[25]</sup>。如图 8 所示的环状网络, 电源点 1 到负荷点 4 的最小割集为 {A,B}、{D,E}、{A,C,E}、

{D,C,B}。

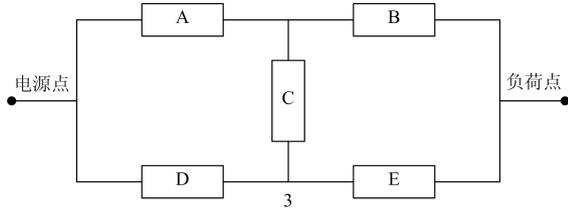


图 8 环状网络模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of loop network

实际中配电系统一般具有规模大和拓扑结构复杂的特点, 往往采用计算机编程求取最小割集。割集中的元件个数称为割集的阶数, 考虑到三阶以上故障可能性很小, 一般可靠性评估中仅考虑一阶和二阶故障。一阶割集的故障率及修复时间与割集中元件参数相等, 二阶割集中的 2 个元件是并联关系, 因此可得等效的故障率和修复时间为

$$\begin{cases} \lambda_b = \lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2) \\ U_b = \lambda_1 \lambda_2 r_1 r_2 \\ r_b = U_b / \lambda_b = r_1 r_2 / (r_1 + r_2) \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $\lambda_1$ 、 $r_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $r_2$  分别表示二阶割集中 2 个元件的故障率和修复时间。

割集之间为串联关系, 对于负荷点  $L_i$ , 假设  $S$  为其一阶和二阶最小供电割集的集合,  $\lambda_k$ 、 $r_k$  分别为第  $k$  个供电割集的等效故障率和修复时间, 则负荷点  $L_i$  的故障率和年平均停电时间为

$$\begin{cases} \lambda_{L_i} = \sum_{k \in S} \lambda_k \\ U_{L_i} = \sum_{k \in S} \lambda_k r_k \end{cases} \quad (13)$$

基于各负荷点可靠性指标, 即可得到整个配电系统可靠性评估指标。配网系统常用的可靠性指标有系统平均停电频率指标 SAIFI(次/户·年)、系统平均停电持续时间指标 SAIDI(h/户·年)、用户平均停电持续时间指标 CAIDI(h/停电用户·年)、平均供电可用率 ASAI、系统缺供电指标 ENS(MW·h/年), 具体计算方法参见文献[19, 26]。

### 3.2 考虑交流环网切换时间因素

交流环网系统在线路倒闸切换过程中一般需要一定时间, 该因素难以在传统的割集法中考虑, 因此需要在负荷点可靠性指标计算完成后予以修正。根据研究, 考虑环网切换时间的负荷点可靠性指标计算方法为

$$\begin{cases} \lambda'_L = \lambda_L \\ U'_L = U_L - \sum_{i \in S \cap B} \lambda_i p_i (r_i - t_0) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\lambda_L$ 、 $U_L$  为负荷点  $L$  的可靠性指标;  $B$  为负荷点备用割集集合;  $t_0$  为负荷点切换到备用线路所用时间;  $p_i$  为切换成功概率。可以看出, 环网切换时间不会影响负荷点故障率, 但是会减少故障停电时间。对于直流系统, 由于故障隔离和切换时间很短, 因此可不进行修正。

## 4 算例分析

### 4.1 仿真系统介绍

算例系统设计为双端电源“手拉手”拓扑结构, 如图 9 所示, 两端 10 kV 交流母线分别连接一个 2 MW 的电力电子变压器, 并输出 10 kV 直流、750 V 直流和 370 V 交流电压, 三个电压等级的直流负荷分别为 2 MW、0.5 MW、0.5 MW, 两端直流系统通过直流断路器实现合环运行。为了对比交直流系统可靠性的差异, 同时设置了手拉手结构的 10 kV 交流供电系统, 负荷为 2 MW, 区别在于交流系统为环状结构开环运行。

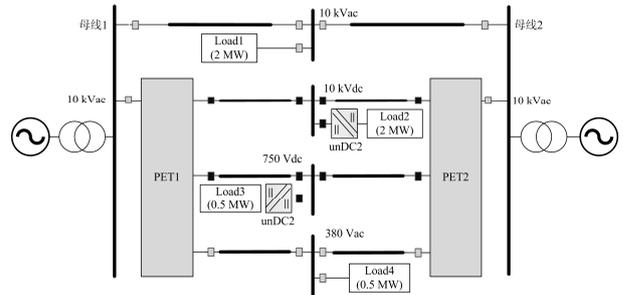


图 9 算例系统拓扑结构

Fig. 9 Topological structure of case studies

系统可靠性参数取自文献[20], 其中元件及辅助系统的可靠性参数如表 2 所示, 这部分数据用来进行 PET 可靠性指标计算, 其他用于交直流配电系统可靠性评估的设备可靠性参数如表 3 所示。设交流系统开关切换时间为 2 h, 切换成功概率为 0.7。

表 2 PET 元件及辅助系统可靠性参数

Table 2 Reliability data of PET component and auxiliary system

元件	故障率/(次/年)
IGBT 模块	0.000 876
电容	0.001 752
MMC 子模块	0.035 040
子模块控制器	0.001 402
桥臂电抗器	0.004 0
DAB 子模块	0.015 91
PET 阀基控制器	0.026 28
PET 控保系统	0.030 0
PE 阀冷系统	0.020 0

表 3 交直流配电网设备的可靠性参数

Table 3 Reliability data of AC/DC distribution devices

元件	故障率/(次/年)	修复时间/(h/次)
交流断路器	0.006	4
直流断路器	0.006	4
逆变器 DC/AC	0.005	16
单向直流变压器	0.075	16
交、直流电缆	0.002(次/年·km)	30
交流变压器	0.013	10

4.2 PET 可靠性定量计算及影响因素分析

本节根据 PET 可靠性模型对其进行可靠性定量计算,并以设计模式 1 为例,分析不同冗余度水平对 PET 设备可靠性的量化影响。假设电力电子变压器 MMC 和 DC/DC 部分均至少需要 25 个子模块,才能保障系统正常工作,则可计算得到不同冗余度水平下的 PET 可靠性指标如表 4 所示。

表 4 不同冗余下 PET 的平均无故障时间和故障率

Table 4 MTTF and failure rate of PET under different redundancy

冗余度 $k/n$	MTTF/年	故障率 $\lambda$ /(次/年)	增加冗余提高的 MTTF/年	增加冗余减少的 $\lambda$ 值/(次/年)
25/25	1.001 4	0.998 7	—	—
25/27	2.891 4	0.345 9	1.890 0	0.652 8
25/29	4.648 7	0.215 1	3.647 3	0.783 5
25/31	6.290 7	0.159 0	5.289 3	0.839 7
25/33	7.831 6	0.127 7	6.830 2	0.871 0

从表 4 可以看出, PET 的平均无故障时间随冗余度呈近似线性增长趋势。而由于故障率为 MTTF 的倒数,因此故障率随冗余度呈近似反比例函数关系,即随着冗余度的增加,故障率迅速下降且变化率越来越小。

为了进一步研究 PET 故障率与冗余度的关系,分别考虑不同的子模块数量,保证系统正常工作的最小模块数量分别为 25、35、45、55,计算得到 PET 故障率与冗余度的关系,如图 10 所示。

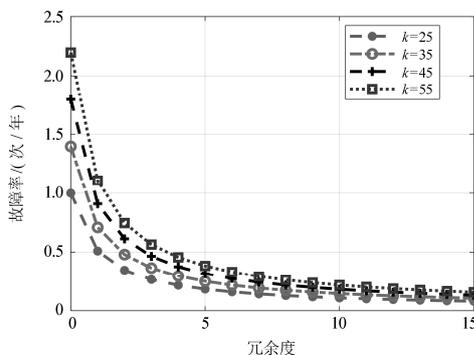


图 10 不同子模块数量下 PET 故障率与冗余度的关系

Fig. 10 Relationship between PET failure rate and redundancy under different number of submodules

由图 10 可以看出,在任一子模块数量下 PET 故障率与冗余度呈反比例函数关系。针对不同子模块数量的情况,无冗余时 PET 故障率差异较大,且随着子模块数量增加而增加;随着冗余度的增大,所有 PET 故障率趋向于一致。因此在实际装置研发中,对于 PET 设置子模块冗余是十分必要的。

4.3 PET 对交直流混合配电系统可靠性影响分析

本节基于 PET 可靠性评估结果及配电系统可靠性评估算法,对图 9 所示的算例系统进行可靠性量化分析。首先考虑 PET 两种模式计算负荷点可靠性指标,分别在无冗余和冗余度为 2(冗余比例 8%)的情况下,计算负荷点可靠性结果如表 5 所示。

表 5 PET 不同模式下的负荷点可靠性指标

Table 5 Load reliability indices under different types of PET

PET 模式	负荷点	故障率 $\lambda$ (次/年)	平均停电时间 $r$ /(h/次)	可用率 $U$ /%
模式 1 无冗余	L1	0.058 0	21.931 0	99.992 01
	L2	1.467 3	2.331 7	99.960 94
	L3	1.590 9	2.307 2	99.958 10
	L4	1.590 9	2.307 2	99.958 10
模式 1 有冗余	L1	0.058 0	21.931 0	99.992 01
	L2	1.145 5	2.419 1	99.968 37
	L3	1.268 3	2.380 7	99.965 53
	L4	1.268 3	2.380 7	99.965 53
模式 2 无冗余	L1	0.058 0	21.931 0	99.992 01
	L2	0.377 1	3.171 2	99.986 35
	L3	0.494 4	2.913 9	99.983 55
	L4	0.494 4	2.913 9	99.983 55
模式 2 有冗余	L1	0.058 0	21.931 0	99.992 01
	L2	0.156 3	4.614 8	99.991 77
	L3	0.193 9	4.147 3	99.990 82
	L4	0.193 9	4.147 3	99.990 82

由表 5 可以看出,模式 2 下各负荷点的供电可靠性水平远高于模式 1,交流负荷节点 L1 的故障率远低于直流负荷点 L2、L3 以及经过直流变换环节的交流负荷点 L4,这是由于目前直流设备可靠性较低。但是可以看出,由于直流闭环运行且无故障切换时间,在模式 2 且有冗余的情况下,直流负荷点的平均停电时间较短,因此直流负荷点整体的供电可用率与交流负荷点水平相当。PET 有冗余的情况下,直流负荷点可靠性指标高于无冗余的情况。

基于负荷点可靠性指标,可以得到系统级可靠性指标,分别考虑无冗余和有冗余(冗余比例 8%)两种情况,并分别针对 PET 两种模式进行分析,计算得到各场景下系统可靠性指标对比如表 6 所示。

由表 6 可以看出, PET 采用模式 2(即各部分故障不会影响其他模块正常工作)时系统可靠性明显

表 1 PET 不同模式下的系统可靠性指标

Table 1 System reliability indices under different types of PET

指标	模式 1	模式 1	模式 2	模式 2
	无冗余	有冗余	无冗余	有冗余
ISAFI/(次/年)	0.928 31	0.735 05	0.272 91	0.124 50
ISAIID/(h/年)	2.382 65	1.992 29	1.046 43	0.729 34
ICAIID/(h/年)	10.166 53	10.216 18	10.623 66	11.447 78
IASAI/%	99.972 80	99.977 26	99.988 05	99.991 67
IASUI/%	0.027 20	0.022 74	0.011 95	0.008 33
IEENS/MW-h	13.057 25	11.105 46	6.376 15	4.790 68

高于模式 1 下的系统可靠性指标, 因此在含有 PET 的系统可靠性评估中, 需要考虑 PET 设计模式的差异性。另外可以看出, PET 采用冗余设计可以大大提升系统可靠性水平。

#### 4.4 PET 对交直流混合配电系统可靠性影响灵敏度分析

进一步地, 进行 PET 冗余度对交直流混合配电系统可靠性影响及灵敏度分析。其中 L1 负荷点作为交流系统可靠性指标, 综合 L2—L4 负荷点可靠性指标并作为直流系统可靠性指标。交流系统分别不考虑环网和考虑环网; 直流系统考虑 PET 不同的冗余度水平, 并且分别考虑直流元件可靠性水平为原来的 50%、75%、100%、125%、150%, 得到各种场景下交、直流系统的供电可用率指标如图 11 所示。

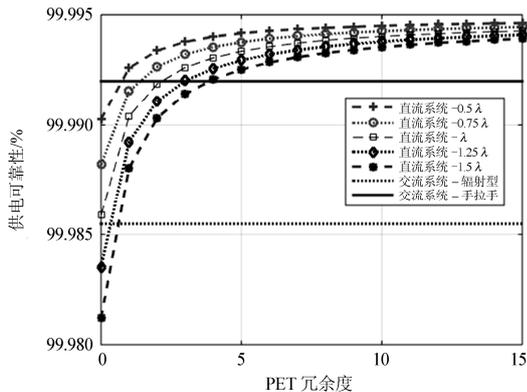


图 11 不同场景下交、直流系统可靠性水平对比

Fig. 11 Comparison of the reliability level between AC and DC systems under different scenarios

由图 11 可以看出: 1) PET 无冗余设计情况下, 以目前电力电子元件的可靠性水平, 直流系统的可靠性与交流辐射型系统接近, 但是远低于手拉手环网结构的交流可靠性; 2) 随着 PET 冗余度的增加, 即使电力电子设备可靠性水平下降, 直流系统可靠性水平也会逐渐达到交流环网可靠性水平; 3) 对于基准案例, 当 PET 冗余度为 2(冗余比例 8%)时, 以

目前的电力电子设备可靠性水平, 直流系统可靠性超过了环网结构的交流系统可靠性; 当冗余度增加至 4(冗余比例 16%)时, 即使电力电子设备可靠性水平下降, 直流系统的可靠性水平仍然高于环网结构的交流系统。

## 5 结论

本文针对未来中高压配电网的核心装置多端口级联式的电力电子变压器进行可靠性建模, 分别考虑了不同设计模式和冗余水平因素, 基于  $k/n(G)$  系统可靠性原理推导了 PET 可靠性计算公式, 并分析了 PET 对交直流配网可靠性的影响。通过研究得出以下结论。

(1) PET 故障率随冗余度呈近似反比例函数关系, 即随着冗余度的增加, 故障率迅速下降且变化率越来越小。

(2) PET 采用模式 2 时系统的可靠性远高于模式 1 下系统的可靠性指标, 因此需要考虑 PET 设计模式的差异性, PET 采用冗余设计可以大大提升系统的可靠性水平。

(3) PET 无冗余设计时, 在目前电力电子元件可靠性水平下, 直流系统的可靠性高于交流辐射型系统, 但是远低于手拉手环网结构的交流可靠性。

(4) 随着 PET 冗余度的增加, 即使电力电子设备可靠性水平下降, 直流系统可靠性水平仍然高于辐射型结构的交流系统。

(5) 对于基准案例, 当 PET 冗余度为 2(冗余比例 8%)时, 以目前的电力电子设备可靠性水平, 直流系统可靠性高于环网结构的交流系统可靠性; 当 PET 冗余度增加至 4(冗余比例 16%)时, 即使电力电子设备可靠性水平下降, 直流系统的可靠性水平仍然高于环网结构的交流系统。

## 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] 付东, 陈冰, 张勇军. 柔性直流配电网的运行原理与建模综述[J]. 广东电力, 2018, 31(4): 1-8.  
FU Dong, CHEN Bing, ZHANG Yongjun. Review on connection mode and modeling of flexible DC power distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 1-8.

- [3] 田鑫, 高亮, 张俊峰. 基于电压源换流器的直流配电限流方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 62-68.  
TIAN Xin, GAO Liang, ZHANG Junfeng. Research on current limiting scheme of DC distribution based on voltage source converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 62-68.
- [4] 姚钢, 纪飞鹏, 殷志柱, 等. 直流配电电能质量研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 163-170.  
YAO Gang, JI Feipeng, YIN Zhizhu, et al. Review on the research of DC power distribution power quality[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 163-170.
- [5] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.  
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [6] 曾嘉思, 徐习东, 赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2582-2589.  
ZENG Jiasi, XU Xidong, ZHAO Yuming. Reliability comparison of AC and DC distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2582-2589.
- [7] SITHIMOLADA V, SAUER P W. Facility-level DC vs. typical ac distribution for data centers: a comparative reliability study[C] // TENCON 2010-2010 IEEE Region 10 Conference, November 21-24, 2010, Fukuoka, Japan: 2102-2107.
- [8] 史清芳, 徐习东, 赵宇明. 电力电子设备对直流配电网可靠性影响[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 725-732.  
SHI Qingfang, XU Xidong, ZHAO Yuming. Effects of power electronic devices on DC distribution reliability[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 725-732.
- [9] BABOLI P T, MOGHADDAM M P, HAGHIFAM M R, et al. Serving flexible reliability in hybrid AC-DC microgrid using demand response and renewable energy resources[C] // Power Systems Computation Conference, August 18-22, 2014, Wroclaw, Poland: 1-7.
- [10] 胡顺威, 周晖, 从黎, 等. 基于故障树的含电力电子变电站配电网可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 25-31.  
HU Shunwei, ZHOU Hui, CONG Li, et al. Reliability analysis of distribution network with power electronic substation based on fault tree[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 25-31.
- [11] 李子欣, 王平, 楚遵方, 等. 面向中高压智能配电网的电力电子变压器研究[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2592-2601.  
LI Zixin, WANG Ping, CHU Zunfang, et al. Research on medium-and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic transformer[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2592-2601.
- [12] HE Yuqing, CHEN Yuehui, YANG Zhiqiang, et al. A review on the influence of intelligent power consumption technologies on the utilization rate of distribution network equipment[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 183-193. DOI: 10.1186/s41601-018-0092-2.
- [13] 陈启超, 纪延超, 潘延林, 等. 配电系统电力电子变压器拓扑结构综述[J]. 电工电能新技术, 2015(3): 41-48.  
CHEN Qichao, JI Yanchao, PAN Yanlin, et al. Review of power electronic transformer topologies applied to distribution system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering Energy, 2015(3): 41-48.
- [14] 孙广星, 苟锐锋, 孙伟. 基于 MMC 结构的电力电子变压器拓扑结构及控制策略研究[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 142-147.  
SUN Guangxing, GOU Ruifeng, SUN Wei. Research on topology and control strategy of power electronic transformer based on MMC structure[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 142-147.
- [15] 刘闯, 支月媚. 混合级联式电力电子变压器拓扑结构及控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 596-603.  
LIU Chuang, ZHI Yuemei. Hybrid cascaded power electronics transformer topology and control scheme[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 596-603.
- [16] 杨晓峰, 郑琼林, 薛尧, 等. 模块化多电平换流器的拓扑和工业应用综述[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 1-10.  
YANG Xiaofeng, ZHENG Qionglin, XUE Yao, et al. Review on topology and industry applications of modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 1-10.
- [17] 丁明, 王京景, 宋倩. 基于  $k/n(G)$  模型的柔性直流输电系统换流阀可靠性建模与冗余性分析[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 32-36.  
DING Ming, WANG Jingjing, SONG Qian. Reliability modeling and redundancy analysis of converter valves for VSC-HVDC power transmission system based on k-out-of-n: G model[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 32-36.
- [18] 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.
- [19] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [20] 王秀丽, 郭静丽, 庞辉, 等. 模块化多电平换流器的结构可靠性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1908-1914.  
WANG Xiuli, GUO Jingli, PANG Hui, et al. Structural reliability analysis of modular multi-level converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1908-1914.
- [21] 郭永基. 可靠性工程原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [22] 卢林煜, 王鲁杨, 柏扬, 等. 面向能源互联网的固态变压器中双有源桥直流变换器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 141-150.  
LU Linyu, WANG Luyang, BAI Yang, et al. Research on dual-active-bridge DC-DC converter in solid state transformer for energy internet[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 141-150.
- [22] 赵华, 王主丁, 谢开贵, 等. 中压配电网可靠性评估方法的比较研究[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3295-3302.  
ZHAO Hua, WANG Zhuding, XIE Kaigui, et al. Comparative study on reliability assessment methods for medium voltage distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3295-3302.
- [23] 丁明, 张静, 李生虎. 基于序贯蒙特卡罗仿真的配电网可靠性评估模型[J]. 电网技术, 2004, 28(3): 38-42.  
DING Ming, ZHANG Jing, LI Shenghu. A sequential Monte-Carlo simulation based reliability evaluation model for distribution network[J]. Power System Technology, 2004, 28(3): 38-42.
- [24] 王秀丽, 罗沙, 谢绍宇, 等. 基于最小割集的含环网配电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 52-58.  
WANG Xiuli, LUO Sha, XIE Shaoyu, et al. Reliability evaluation of distribution systems with meshed network based on the minimum-cut set[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 52-58.
- [25] 曾嘉思. 柔性直流配电网可靠性评价方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.  
ZENG Jiasi. Research on reliability evaluation method of flexible DC distribution network[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [26] 程铁汉, 贾娜, 钟建英, 等. 基于耦合负压回路的混合式直流断路器研究[J]. 南方电网技术, 2018, 12(2): 64-69.  
CHENG Tiehan, JIA Na, ZHONG Jianying, et al. Research of hybrid HVDC circuit breaker based on inductance coupling circuit[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(2): 64-69.

收稿日期: 2018-11-13; 修回日期: 2019-05-06

作者简介:

杨汾艳(1982—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为交直流电力系统分析; E-mail: yang-fenyan@163.com

李海波(1990—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为高比例可再生能源电力系统及交直流混合电网规划与可靠性; E-mail: lihaibo@tsinghua.edu.cn

盛超(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力电子和柔性输电技术。E-mail: 13602755152@139.com

(编辑 许威)