

DOI: 10.7667/PSPC171625

## 基于故障树的含电力电子变电站配电网可靠性分析

胡顺威<sup>1</sup>, 周晖<sup>1</sup>, 从黎<sup>1</sup>, 张祥龙<sup>2</sup>, 刘颖<sup>2</sup>, 肖智宏<sup>2</sup>, 刘海军<sup>3</sup>, 曹天植<sup>4</sup>

(1. 北京交通大学, 北京 100044; 2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209; 3. 先进输电国家重点实验室(全球互联网能源研究院有限公司), 北京 102211; 4. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045)

**摘要:** 电力电子变电站较常规变电站, 除能实现变压外, 还具有功率控制及灵活的 AC、DC 接口等功能, 在配电网中得以示范应用, 其供电可靠性水平如何是重点关注的问题。为此, 在清楚电力电子变电站中电力电子变压器工作原理、电力电子变电站的组成、主接线的基础上, 分析配电网中电力电子变电站的运行方式, 采用故障树分析方法, 构建了含电力电子变电站配电网的可靠性分析模型。并通过最小割集的计算, 得到了该网的年故障率、年停电时间等可靠性指标。最后运用示范电力电子变电站工程项目数据分析计算, 发现含电力电子变电站的配电网可靠性指标略低于常规站的配电网。

**关键词:** 电力电子变电站; 配电网; 可靠性分析; 故障树; 运行方式

### Reliability analysis of distribution network with power electronic substation based on fault tree

HU Shunwei<sup>1</sup>, ZHOU Hui<sup>1</sup>, CONG Li<sup>1</sup>, ZHANG Xianglong<sup>2</sup>, LIU Ying<sup>2</sup>, XIAO Zhizhong<sup>2</sup>, LIU Haijun<sup>3</sup>, CAO Tianzhi<sup>4</sup>

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102211, China; 4. Electric Power Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Company, Beijing 100045, China)

**Abstract:** Compared with the conventional substation, power electronic substation can not only transform voltage, but also control power and offer power electronic AC and DC interfaces. Therefore, power electronic substation is applied to a demonstration project of distribution network. Its reliability level of power supply is a key concern. Based on the understanding of the principle of Power Electronic Transformer (PET) and the composition of power electronic substation and its main connection scheme, the operation modes of distribution network are analyzed. The reliability analysis model of power electronic substation distribution network is constructed by adopting the fault tree analysis method. The crucial reliability index, such as annual failure rate and annual failure time of the distribution network, is obtained by the minimum cut set. Finally, by means of analyzing and calculating the data collected from demonstration power electronic substation project, it is found that the reliability index of distribution network with power electronic substation is slightly lower than that of the conventional substation.

This work is supported by Major Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5205A016002) and Major Fund “Advanced Rail Traffic” of National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB1201000).

**Key words:** power electronic substation; distribution network; reliability analysis; fault tree; operation mode

## 0 引言

随着矿物燃料的日益枯竭和全球环境的恶化, 以太阳能和风能为代表的高效、清洁、可再生的分

布式能源发电技术得到了世界各国的重视<sup>[1]</sup>, 其发展势头十分迅猛。以风电为例, 在风力资源丰富的“三北”地区, 建设了不少有一定规模的风电场。但由于光照和风力资源具有间歇性、随机性的特点, 对电网运行的安全与经济性等都会产生一定的影响。如何充分利用这些新能源, 同时使电网面对不确定的发电输入时具有灵活控制能力, 成为当前电

**基金项目:** 国家电网公司重大科技项目(5205A016002); 国家重点研发计划“先进轨道交通”重点专项(2017YFB1201000)

网迫切需要解决的问题<sup>[2]</sup>。

同时, 电力电子器件制造技术和电力电子变流技术逐步成熟, 研制出由高频变压器和电力电子变换器组成的新型变电设备——电力电子变压器<sup>[3]</sup>。由于它具有灵活的功率调节以及交直流转换等多种功能, 不仅能方便地接入分布式能源、电动汽车蓄电池等双向负荷、储能装置, 还能方便地调控配电网的运行方式。因此, 电力电子变压器成为了未来交直流混合电网中的关键设备<sup>[4]</sup>。在我国张北的柔直示范工程中, 率先将其应用于一个 10 kV 的电力电子变电站中<sup>[5]</sup>。在这种情况下, 变电站类型的变化到底会对配电网供电可靠性将产生怎样的影响, 成为大家重点关注的问题<sup>[6]</sup>。为此, 需要对其可靠性水平进行分析与测算, 从而可以预估其运行的可靠性水平, 为电力电子变电站的推广建设, 提供决策依据。

配电系统的可靠性管理, 一直是我国电力部门工作的重中之重<sup>[7]</sup>。为此, 早在 1981 年就建立了电力系统安全稳定准则, 将其贯彻于系统规划、设计、建设、运营的各个环节。相应地, 电力系统可靠性理论以及分析研究, 长期以来也是学术界的热点。可靠性分析方法有解析法、蒙特卡洛模拟法两类, 其中最为常见的解析法是故障树分析法。解析法的主要优点是可以采用严格的数学模型和有效的算法对系统可靠性进行周密的分析, 准确度较高。

近年来, 配电网由于接入分布式电源 (Distributed Generation, DG), 由无源变成有源。且随着大量 DG 和直流负荷的增加, 以及换流设备引入, 配电网也由纯交流电网变成了交直流混合电网<sup>[8]</sup>。这种情况下配电网可靠性的研究, 再一次成为大家关注的热点<sup>[9]</sup>。其中文献[10]对含光伏的配电网, 利用序贯蒙特卡洛法, 从供电电源类型和供电方式方面进行研究, 对配电网的可靠性进行分析。文献[11]对一个双极两端柔性直流输电系统进行了可靠性建模与评估, 并研究了元件故障率变化对柔性直流输电系统可靠性的影响。文献[12]对含换流站、直流断路器的交直流配电网, 采用最小割集法对其可靠性进行了分析与评估。

电力电子变压器进入配电网层次的应用研究, 处在起步阶段。文献[2]介绍了应用于配电网的电力电子变压器样机, 通过仿真与实验, 验证了它具有抑制谐波等功能。但在系统层面上的更深入的研究, 尚不多见<sup>[13]</sup>。如文献[14]为对含 PET 的配电网无功优化进行研究, 但对于基于电力电子变压器的电力电子变电站配电网可靠性研究, 未见报导。

故障树可靠性分析方法, 曾成功解决了电厂、

电网、含 DG 的配电网等不同对象的可靠性问题, 简单有效。为此, 分析含电力电子变电站交直流混联配电网可靠性问题时, 拟采用此方法。

## 1 故障树分析法的基本理论

### 1.1 故障树的基本概念与图形表示

故障树分析法<sup>[15]</sup>是一种图形演绎分析方法, 它是对系统故障采用由果到因、从整体至局部、按树枝状逐渐细化的方法。其中, 建立故障树是分析中最关键的一步。

所谓的故障树, 是把最不希望发生的故障状态作为故障分析的目标, 找出导致这一事件所有可能的直接原因和因素, 再追踪找出导致这些中间事件所有可能发生的直接原因, 层层追踪, 直到找出故障的基本原因, 用相应的代表符号及逻辑门所联结成树形图。

在故障树分析中, 用到的基本概念有:

底事件——只导致其他事件发生的原因事件, 位于故障树底端。

顶事件——所关心的结果事件, 它是故障树的分析目标, 位于故障树的顶端, 是逻辑门的输出端。

中间事件——位于底事件和顶事件之间的中间结果事件。它既是前一级逻辑门的输出事件, 又是后一级逻辑门的输入事件。

表示故障树中事件及各事件之间的逻辑关系, 用表 1 所示符号。

表 1 故障树中事件及逻辑关系用的符号及其含义

Table 1 Symbols and meanings of events and logical relations for fault tree

类别	名称	符号	含义
逻辑关系	与关系		当输入事件同时发生时, 输出事件才发生
	或关系		当输入事件至少有一个发生时, 输出事件才发生
事件名称	矩形事件		顶事件或中间事件
	圆形事件		基本事件或底事件

### 1.2 故障树分析步骤

运用故障树进行分析时, 一般按照以下步骤:

- ① 定义系统和系统故障, 确定系统故障事件, 即“顶事件”;
- ② 建立故障树;
- ③ 求故障树的最小割集;
- ④ 求系统故障概率。

其中, 在以上分析步骤中, 最小割集的确定十分关键。故障树  $F_T$ , 是由所有集合  $B_1, B_2, \dots, B_m (i=1, \dots, m)$ , 其中  $m$  为基本事件集合的个数) 组成

的集成, 表示为

$$F_T = \left\{ \bigcup_{i=1}^m B_i \right\} \quad (1)$$

此处,  $B_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ik}\}$ , 是基本事件的集合。

只有当某集合  $B_i$  中基本事件同时发生时, 顶事件才发生, 则称为故障树的一个割集。如果从  $B_i$  中任意移走一个基本事件后, 顶事件不发生, 则称之为最小割集。其中, 最小割集的个数为  $n$  ( $n \leq m$ )。

故障树最小割集的求解顺序为: 从故障树的顶事件开始, 紧接着顶事件的若是或门, 则把每个输入事件分别列入不同的行; 紧接着顶事件的若是与门, 则把每个输入事件列入同一行。依次从上到下分解, 直到基本事件为止。此时最后一列代表所有割集, 再将割集简化得到全部最小割集。

当已知基本事件的概率, 根据求出的最小割集  $B_1, B_2, \dots, B_n$ , 可求得即系统故障出现的概率为

$$P\{F_T\} = P\left\{ \bigcup_{i=1}^n B_i \right\} \quad (2)$$

式中:  $\cup$  表示最小割集的并关系, 概率是和运算。

## 2 电力电子变电站的组成及配电网的运行模式

### 2.1 电力电子变压器的组成及工作原理

电力电子变压器<sup>[16]</sup>是电力电子变电站内主要设备, 基于电力电子变换技术和电能变换技术, 将一种电力特征的电能转变为另一种电力特征的电能由电力电子变换器、高频变压器和控制柜组成, 其原理图如图 1 所示。电力电子变压器有五个变换环节: AC/DC、DC/AC、高频变压器、AC/DC、DC/AC。

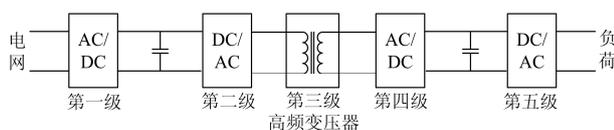


图 1 电力电子变压器的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of power electronic transformer

电力电子变压器是将工频交流电经过环节 1 调制为直流, 后通过环节 2 将直流变换为高频交流电, 再通过环节 3 高频变压器将高频交流电经过二次侧绕组将感应电动势施加到第四级变换器, 此后环节 4 将高频交流电转换为直流, 最后通过环节 5 将直流电变换为工频交流电, 供给负荷。

由于电力电子变换器的存在, 电力电子变压器可以实现有功和无功功率调控<sup>[17]</sup>; 此外, 电力电子变压器的 DC、AC 接口, 能实现 DG 的接入及交直

流电网的互联。

### 2.2 电力电子变电站的组成及接线方案

电力电子变电站亦称之为柔性变电站, 后者是 2015 年智能电网研究院率先提出的概念, 它具有潮流控制, 支撑有功、无功、电气隔离, 避免谐波互相传递等功能。为此, 电力电子变电站示范项目除了包含断路器、母线、隔离开关外, 还包括了具有灵活控制功能且能变压的新型电气设备——电力电子变压器。

电力电子变电站中的电力电子变压器有 4 个接口, 分别是高压 AC、DC 接口, 低压 AC、DC 接口, 其具体接线方式, 如图 2 所示。

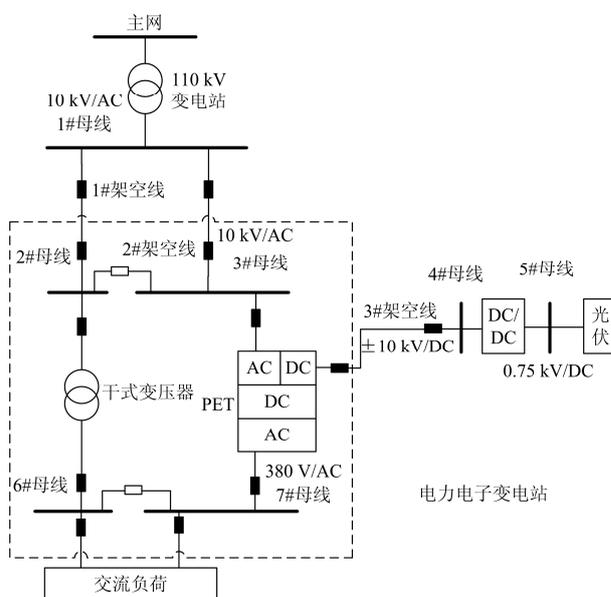


图 2 含电力电子变电站的配电网接线示意图

Fig. 2 Connection of distribution network with the power electronic substation

由图 2 可看出, 该站有两路交流进线和一路直流进线, 分别是来自 110 kV 变电站的出线和来自 0.75 kV、2.5 MW 的光伏站, 其中交流进线在高压侧采取单母分段方式, 通过一台干式变压器和一台电力电子变压器高压 AC 接口, 经单母分段的低压交流母线, 向交流负载供电。一路直流进线来自光伏站, 通过架空线路, 接至电力电子变压器的高压 DC 接口, 输出 380 V 低压, 与干式变压器的低压输出构成单母分段, 共同为 2.5 MW 交流负荷供电。其中, 图中虚线框内表示电力电子变电站的内部接线。

### 2.3 含电力电子变电站配电网的运行模式

在图 2 所示的配电网中, 交流负荷的电源来自 110 kV 变电站和光伏站。其中, 110 kV 变电站与大

电网相连,假设该电源的可靠性为100%,而光伏发电具有间歇性,电源是断续的。因此,在可靠性计算时,需要考虑其影响。为此,根据光伏电站是否有出力,负荷电力供应有两种运行模式,见图 3。即当光伏电站有出力时,负荷供电路径如图 3(a):主网经 110 kV 变电站、10 kV 母线、干变与电力电子变电站、两段 380 V 母线向负荷供电;光伏电站经 DC/DC 换流站和高压侧 DC/AC(环节 2 和环节 1)、干变向交流负荷供电;或者光伏电站经过 DC/DC 换流站和低压侧 DC/AC(环节 2、3、4、5 和高压变频器)。当光伏电站无出力时,负荷供电的路径,则如图 3(b)。

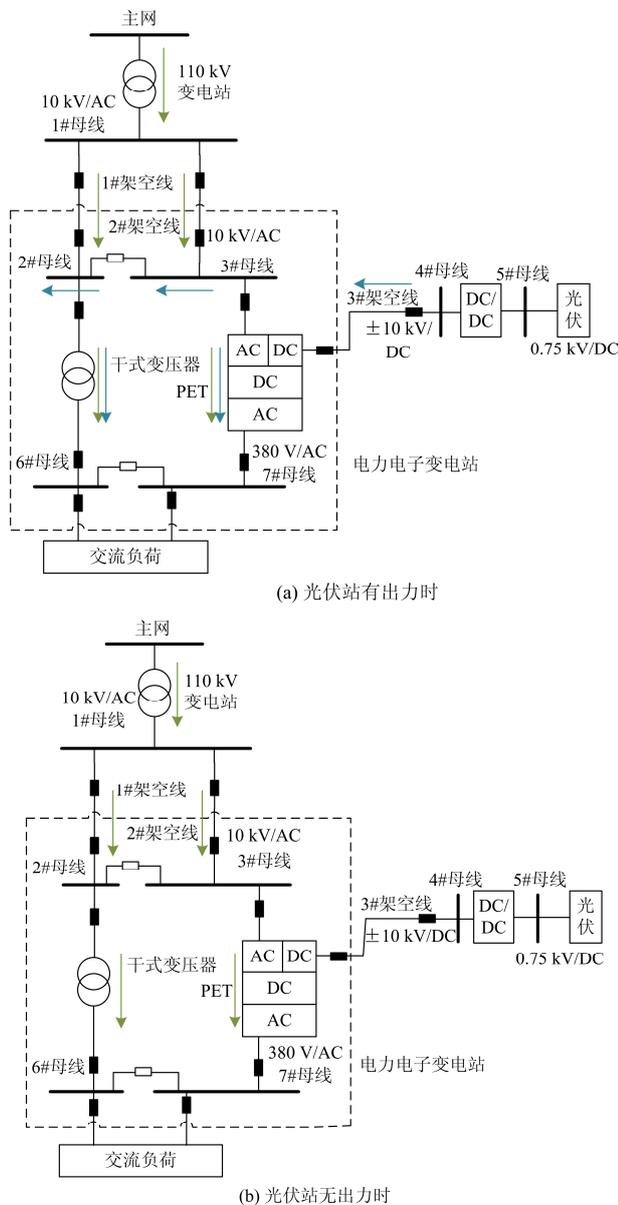


图 3 不同运行模式下负荷供电路径

Fig. 3 Power supply path to load under different operating modes

### 3 含电力电子变电站的配电网可靠性分析

#### 3.1 考虑运行方式的故障树模型

由于分析的对象仅有一个负荷,因此可将负荷供电不足定为系统故障,即顶事件。底事件为 110 kV 变压器故障、母线故障、架空线故障、干式变压器故障、DC/DC 换流站故障、电力电子变电站故障(6 种)。其中电力电子变电站故障具体包括:高压、低压侧换流器故障及高频变压器故障。根据主接线方案,考虑电力电子变电站多种运行方式,由果到因分析底事件。

对于电力电子变电站,根据供电路径中高压、低压换流器和高频变压器端口使用,它的可靠性参数视为相应的换流器和的串联;对于光伏电站,由于光伏出力和无出力对系统故障有影响,因此将光伏电站分为光伏出力和光伏无出力两种情况。

$$a_k = \frac{T_j}{T_N} \tag{3}$$

式中:  $T_j$  表示一年中是否有光伏出力的小时数;  $T_N$  表示一年的总小时数,为 8 760 h。根据某光伏示范工程实际年运行小时数为 1 491 h,根据式(3),光伏出力概率为  $\alpha_1=1/6$ ,则光伏无出力的概率为  $\alpha_2=5/6$ 。

分两种情形建立故障树。

##### (1) 光伏有出力时

光伏有出力时,顶事件为负荷供电不足,中间事件为 110 kV 不能供电和光伏电站不能供电,根据负荷的供电路径,依次分析底事件。如图 4 所示。

由图 4 故障树,按照最小割集的求解方法,得出在光伏电站有出力最小割集有 97 个。例如,最小割集(光伏 DC/DC 故障, 3#母线故障, 2#母线故障),其中光伏 DC/DC 故障是光伏电站不能供电下的一个底事件, 3#母线和 2#母线的并集是 110 kV 变电站不能供电下的一个子集,故光伏 DC/DC 故障与 3#母线故障、2#母线故障的并集是系统故障的一个最小割集。其他割集依此类推。

##### (2) 光伏电站无出力时

在光伏电站无出力时的中间事件为 110 kV 站不能供电,根据供电方式依次分析底事件。同样根据故障树和最小割集求解方法,得出该情形最小割集有 39 个。

### 3.2 可靠性指标的计算

#### 3.2.1 计算步骤

含电力电子变电站的配电网可靠性指标的计算,按以下步骤进行。

第一步:配电网分有光伏出力和无光伏出力两

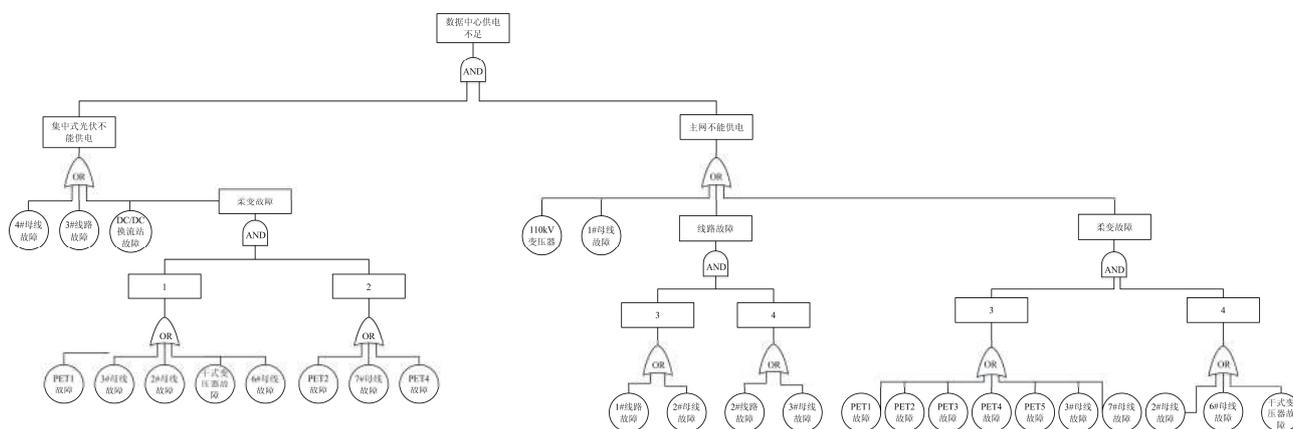


图 4 光伏电站有出力时的故障树

Fig. 4 Fault tree when PV station generating

种情况, 用  $k=1$  表示有光伏出力,  $k=2$  表示无光伏出力。

第二步: 分别按照 3.1 节建立模型求得最小割集, 根据公式(2)求出故障情况下的系统年故障率  $P_k(k=1, 2)$ 。

第三步, 由每一最小割集的年故障率, 乘以相应的故障修复时间  $h$ , 可以得到系统的年故障时间  $T_k(k=1, 2)$ , 即

$$T_k = \sum_{i=1}^n P(B_i) \times h_i \quad (4)$$

第四步, 根据两种光伏出力情况下的概率和年故障时间, 算出系统年故障率  $P$  和年故障时间  $T$ , 即

$$P = \sum_{k=1}^2 (\alpha_k \times P_k) \quad (5)$$

$$T = \sum_{k=1}^2 (\alpha_k \times T_k) \quad (6)$$

### 3.2.2 配电网的可靠指标计算

底层元件出现故障, 导致系统故障的发生, 故可根据底层元件的可靠性参数计算配电网的可靠性。变电站内元件的可靠性参数, 如母线、线路、干式变压器、换流器等设备的故障率和故障修复时间, 如表 2 所示。其中, 换流器的可靠性参数来自文献[18-19]。

表 2 配电网可靠性分析用参数

Table 2 Parameters used in reliability analysis for distribution network

参数	母线	线路	干式 变压器	换流 设备	高频 变压器
故障率/(次/年)	0.3	0.5	0.005	0.526	0.004
故障修复时间/(h/年)	2	5	100	16	100

则光伏有出力时, 按照式(2)计算出系统年故障

率  $P_1=0.619$ , 按照式(4)计算出年故障小时为  $T_1=20.18$  h。

同样地, 光伏无出力时, 系统年故障率  $P_2=0.645$ , 年故障小时为  $T_2=13.12$  h。

综合以上两种情况, 根据式(5)求得含电力电子变电站的配电网年故障率  $P=0.641$ 。根据式(6)求得的配电网的年故障时间  $T=14.3$  h。

### 3.3 含常规变电站的配电网可靠性分析

为了比较含电力电子变电站的配电网的可靠性水平有何变化, 将之与常规变电站的配电网进行比较。其接线图与图 2 类似, 所不同的是把电力电子变电站内的一台电力电子变压器换成了 3#传统的干式变压器。为保证两者的可比性, 考虑到传统变电站没有直流母线, 设计光伏电站通过 DC/AC 变流器后升至 10 kV 后接入常规站的 10 kV 的 3#高压母线, 如图 5 所示。

对于该配电网可靠性指标的计算过程, 同含电力电子变电站的配电网的一样, 按 3.2.1 节进行, 同样分光伏有出力和无出力两种情况。

#### (1) 光伏有出力时

在光伏有出力时, 顶事件为负荷供电不足, 中间事件为 110 kV 变电站不能供电和光伏电站不能供电, 根据供电路径依次分析底事件。同样, 求得最小割集有 90 个。

此时系统故障率  $P'_1=0.315$ ; 年故障时间  $T'_1=6.43$  h。

#### (2) 光伏无出力时

光伏无出力时, 顶事件为负荷供电不足, 中间事件为 110 kV 变电站不能供电, 根据供电路径依次分析底事件。同样, 据此得到最小割集有 20 个。

此时系统故障率  $P'_2=0.362$ ; 年故障时间  $T'_2=2.12$  h。

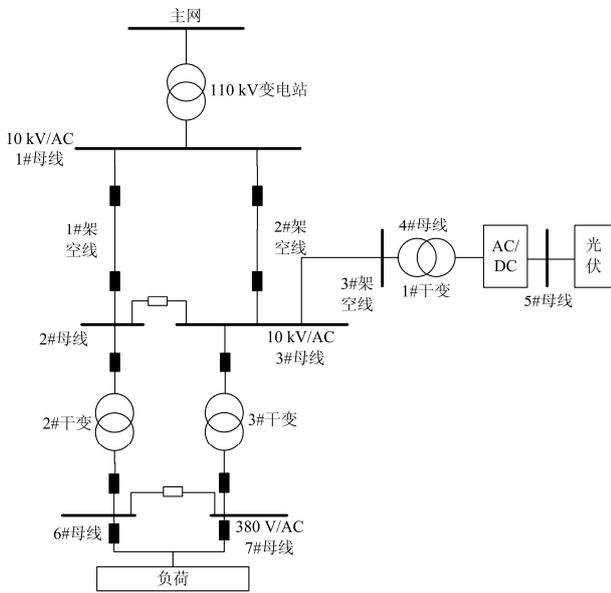


图 5 传统配电网的接线示意图

Fig. 5 Connection diagram of distribution network with traditional distribution network

综上所述，对于含传统变电站的配电网，根据式(5)含柔配网年故障率为  $P^m = 0.354$ ，年故障时间  $T^m = 2.67$  h。

### 3.4 含不同变电站的配电网可靠性比较

将 3.2 节和 3.3 节含不同类型变电站的配电网可靠性分析计算结果，包括最小割集数和系统故障率和故障时间，列表如表 3 和表 4。

表 3 最小割集数的比较

Table 3 Comparison of minimum cut sets number

项目	含电力电子变电站的配电网		含传统站的配电网	
	光伏有出力时	光伏无出力时	光伏有出力时	光伏无出力时
最小割集/个	97	39	90	20

表 4 可靠性分析结果的比较

Table 4 Comparison of reliability analysis

项目	含电力电子变电站的配电网		传统站的配电网	
	光伏有出力时	光伏无出力时	光伏有出力时	光伏无出力时
年故障率/次	0.619	0.645	0.315	0.362
年停电时间/h	20.18	13.12	5.43	2.12

由表 4 可看出，无论是光伏站是有出力还是无出力，含电力电子变电站的配电网和含传统变电站的配电网的年故障率比较接近，一年中故障的次数，均不到 1 次。但在年故障时间差值较大，达到了 10 h

以上。

这说明与传统变电站相比电力电子变电站尽管在运行时具有灵活接入的优势，但考虑到可比性，在两者进行比较时，在传统站的配电网中的光伏站采用变流后升压的方式接入，其供电路径与含电力电子变电站基本相同。而电力电子变电站中的电力电子变压器是一个新型的设备，内部采用了多次变换，相比于常规变压器的可靠性低，进而导致反映含电力电子变电站配电网可靠性水平的参数，无论是年故障率还是年故障时间，都高于含传统变电站的配电网。

## 4 结论与展望

通过以上研究，得到如下几点结论：

1) 含电力电子变电站的配电网示范项目的投资建设，需要对与相连的配电网的可靠性进行预估与评判，便于为今后该项目的运行管理，提供可靠性方面管理的依据。

2) 在对电力电子变电站中电力电子变压器的组成与工作原理分析的基础上，运用故障树方法，分光伏有出力和无出力不同的运行模式，构建了电力电子变电站的配电网可靠性分析模型，由最小割集求得了能反映该配电网可靠性的重要指标——年故障率和年故障停电时间。

3) 基于可比原则，设计了能接入光伏的含传统变电站的配电网系统，采用与含电力电子变电站配电网可靠性分析同样的方法，得到了该情况下配电网的可靠性计算指标。

4) 对比含电力电子变电站的配电网和含传统变电站的配电网可靠性分析结果，前者可靠性水平低于后者，这表明尽管电力电子变电站在配电网运行中有调控灵活、方便接入的优势，但在可靠性方面不占优势。

5) 由于电力电子变压器这种新设备尚未投入商业化运行，缺乏该设备实际运行的可靠性统计参数，给含电力电子变电站的配电网可靠性分析带来困难，采取了基于电力电子变压器组成的内部部件可靠性参数的处理方式，为其他新型电气设备的可靠性研究，提供了可借鉴的分析思路。

由于算例是示范工程项目一期的情况，配电网的网络结构较简单，负荷和分布式电源单一，不能充分展现电力电子变电站的优越性能。此外，以 SiC 等为代表的宽禁带半导体材料的新型半导体材料具有更优越的性能，开始进入商业化应用<sup>[20]</sup>，对电力电子变压器也会产生影响。下一步将就多分布式电源、多负荷，以及配电网采用多个电力电子变电站

互联, 以及基于 SiC 材料的电力电子变压器的应用于配电网等情况下的配电网的可靠性分析, 做更深入的研究。

## 参考文献

- [1] 孙云莲, 杨成月, 胡雯. 新能源及分布式发电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望—试论三代电网[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 1-11.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang. Review and prospect for power system development and related technologies: a concept of three-generation power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 1-11.
- [3] 李子欣, 王平, 楚遵方. 面向中高压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. Research on medium-and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic transformer[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2592-2601.
- [4] 王一凡. 张北可再生能源柔性直流电网示范工程设计启动[N]. 国家电网日报, 2017-02-14.
- [5] SHE X, HUANG A. Solid state transformer in the future smart electrical system[C] // 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 21-25, 2013, Vancouver, Canada: 1-5.
- [6] 刘爽, 牟龙华, 许旭锋, 等. 电力电子器件故障对微电网运行可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 63-70.  
LIU Shuang, MU Longhua, XU Xufeng, et al. Research on power electronic devices failures' effect on micro-grid operational reliability[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 63-70.
- [7] 别朝红, 王锡凡. 配电系统的可靠性分析[J]. 中国电力, 1997, 30(5): 10-13.  
BIE Chaohong, WANG Xifan. Reliability analysis of distribution system[J]. Electric Power, 1997, 30(5): 10-13.
- [8] 秦红霞, 王成山, 刘树, 等. 智能微网与柔性配网相关技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 17-23.  
QIN Hongxia, WANG Chengshan, LIU Shu, et al. Discussion on the technology of intelligent micro-grid and flexible distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 17-23.
- [9] 商连永, 张强, 陆文钦. 光伏发电接入配电网可靠性研究现状与展望[J]. 电工电气, 2017(6): 1-5.  
SHANG Lianyong, ZHANG Qiang, LU Wenqin. Research status and prospect of reliability of power distribution network containing photovoltaic power generation[J]. Electrotechnics Electric, 2017(6): 1-5.
- [10] 刘伟波. 含光伏电源的交直流配电网可靠性分析[D]. 吉林: 东北电力大学, 2016.  
LIU Weibo. AC-DC distribution grid reliability analysis with PV power[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2016.
- [11] 郭静丽, 王秀丽, 侯雨仲, 等. 基于改进 FD 法的柔性直流输电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 8-13.  
GUO Jingli, WANG Xiuli, HOU Yushen, et al. Reliability assessment of the VSC-HVDC transmission system based on a modified FD method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 8-13.
- [12] 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.
- [13] 毛承雄, 王丹. 电子电力变压器[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [14] 张祥龙, 周晖, 肖智宏, 等. 电力电子变压器在有源配电网无功优化中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 80-85.  
ZHANG Xianglong, ZHOU Hui, XIAO Zhizhong, et al. Power electronic transformer applied to optimization of reactive power in active distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 80-85.
- [15] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [16] LI Houzhi, WANG Yubin, YU Chenghao. Research on voltage balance and power balance control for three-phase cascaded multilevel converter based power electronic transformer[C] // IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 23-26, 2016, Florence, Italy: 3588-3593.
- [17] IMAN-EINI H, FARHANGI S. Analysis and design of power electronic transformer for medium voltage levels [C] // 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 18-22, 2006, Jeju, South Korea: 1-5.
- [18] 高逸峰, 张九根, 徐靓. 变电所电气主接线可靠性分析[J]. 建筑电气, 2007(11): 9-13.  
GAO Yifeng, ZHANG Jiugen, XU Liang. The reliability analysis of main electrical connection in transformer substation[J]. Building Electricity, 2007(11): 9-13.
- [19] 史清芳. 柔性直流配电网可靠性若干问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.  
SHI Qingfang. Research on reliability of flexible DC distribution system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [20] HUANG A Q, ZHU Q, WANG L. 15 kV SiC MOSFET: an enabling technology for medium voltage solid state transformers in CPSS[J]. Transactions on Power Electronics and Applications, 2017, 2(2): 118-130.

收稿日期: 2017-11-02; 修回日期: 2018-04-10

作者简介:

胡顺威(1995—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统可靠性, 柔性电力技术等; E-mail: 16126017@bjtu.edu.cn

周晖(1964—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统分析, 经济调度, 电力规划等; E-mail: hzhou@bjtu.edu.cn

从黎(1993—), 女, 硕士, 研究方向为柔性电力技术、变电站设计, 配电系统管理等。E-mail: 15121400@bjtu.edu.cn

(编辑 姜新丽)