

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200696

特大城市两种高压配网典型接线可靠性比较研究

万国成¹, 邓丰强², 张勇军²

(1. 广东电网广州供电局, 广东 广州 510600; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 随着电网规模的扩大, 110 kV 电网在特大城市内多用作高压配网。因此, 对 110 kV 高压配网两种典型接线双链式接线和“3T”接线的可靠性进行了比较研究。给出了用解析法求解两种典型接线可靠性指标的方法, 以及两种不同接线的可靠性指标理论计算值。此外, 还对两种不同接线进行了灵敏度分析。结果表明, 两种接线方式都能满足电网结构实际运行的需要, 但“3T”接线的停电时间短于双链式接线, 并且对自备投装置的正确投运率的灵敏度更好。

关键词: 高压配网; 典型接线; 可靠性; 双链式接线; “3T”接线

Comparative research on typical wiring reliability of two high voltage distribution networks in a megacity

WAN Guocheng¹, DENG Fengqiang², ZHANG Yongjun²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: With the expansion of power grid scale, the 110 kV power grid is most used as the high-voltage distribution network in mega cities. The reliability of double chain connection and "3T" connection of two typical connections in a 110 kV high-voltage distribution network is compared. The method of solving the reliability index of two typical but different connections by analytic method and the theoretical calculation value are given. In addition, the sensitivity analysis of two different wirings is also carried out. The results show that the two connection modes can meet the needs of actual operation of a power grid structure, but the outage time of "3T" connection is shorter than that of a double chain connection, and the sensitivity to the correct operational rate of the standby automatic switching device is better.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2017A030313304).

Key words: high-voltage distribution network; typical wiring; reliability; double-chain wiring; 3T wiring

0 引言

随着电网规模的扩大, 110 kV 电网在大城市的电力输送环节已经完全作为配网来使用^[1-3]。采用何种高压电网结构既要考虑城市发展水平, 也要考虑城市电网发展的历史沿革, 还有建设、运行人员的偏好等。对于特大城市来说, 负荷密度往往更高, 线路或设备的载荷更重; 因线路走廊缺乏, 同杆架设的线路应用更为广泛; 供电可靠性更加被重视^[4]。

目前国内外学者对于不同典型接线可靠性和经济性进行了较多研究^[5-11]。文献[8]对城市 110 kV 高压配电网典型接线方式进行分类, 并对各个类别接线方式可靠性等进行了对比, 但并未定量进行可

靠性计算。文献[9]针对国内外城市高压配电网典型接线, 在满足供电安全性和接线方式适应性的条件下, 将可靠性指标折算为经济性指标加入到经济性规划问题中。文献[10]以典型的配电网接线模式为切入点, 对配电网网架结构进行深入经济技术分析。文献[11]分析比较得出各种接线模式的优劣和适用范围, 结合典型接线模式的分析结果, 提出淮安地区高压配网的目标网架将由过渡网架演变为同杆架异路由双电源辐射式接线。但上述研究涉及的接线方式难以适应特大城市高负荷密度、高可靠性等需求。

目前国内特大城市 110 kV 电网的接线模式归纳起来大致如下: 一种采用“3T”接线(3T Wiring, 3TW)^[12], 如广州电网; 一种采用双链式接线(Double-Chain Wiring, DCW), 如深圳电网。上海电

基金项目: 广东省自然科学基金项目资助(2017A030313304)

网则是加强型 3TW 和 DCW。总体上目前国内几个大城市基本是按照各自城市电网发展的历史沿革与偏好来开展建设, 对于不同电网结构的可靠性水平尚未见有说服力的论证。

在分析方法方面, 现行文献多采用蒙特卡洛模拟法^[13-15]对电网进行可靠性评估。针对配电网可靠性评估方法, 目前还有网络等值方法^[16-17]、状态空间截断法^[18]、熵权法^[19]等。本文将主要针对 DCW 和 3TW, 对两种高压配网典型接线模式进行可靠性分析。在进行可靠性指标分析时, 目前多是在网络等值后采用状态空间方程进行求解。但是状态转移矩阵方程形成的矩阵将十分庞大, 不适合采用状态转移矩阵方程求解。故而本文在网络等值后, 利用解析法^[20-21]对可靠性指标进行求解。此方法将有效减少求解难度, 得到更优结果。

本文将尝试对高压配网两种典型接线 110 kV DCW 和 3TW 的可靠性指标进行论证。文中将采用网络等值方法后, 利用解析法对两种类型高压配网接线模型进行计算, 并且对比了两种接线模式的灵敏度。

1 110 kV 电网接线模式

采用 3TW 接线模式电网结构简单, 所用设备元件少, 设备维护工作量小, 保护设置容易, 调度运行方式灵活; 双环网接线如 110 kV 出线接至同一 220 kV 站, 往往采用两条 110 kV 线路分列运行。

考虑到本文主要讨论 110 kV 电网部分的可靠性水平, 把两种典型接线做相应的简化, 与断路器配套的隔离刀闸在图中不作显示, 示意图中仅保留影响可靠性指标的 110 kV 电网中的主要元件。

典型 110 kV DCW 的电网结构如图 1 所示。两回 110 kV 线路来自同一 220 kV 变电站, 在实际电网建设过程中, 受线路走廊用地及投资的影响, 两回 110 kV 线路大多采用同塔双回建设。在 110 kV 变电站内为单母线分段接线, 正常方式为线路开关运行, 站内 110 kV 分段开关打开, 投入各自投; 10 kV 分段开关也投入各自投。

典型 110 kV 3TW 的电网结构如图 2 所示。每个 110 kV 变电站设 3 台主变, 110 kV 变电站高压侧不设母线, 采用线路变压器组。同一 110 kV 变电站的不同主变所 T 接的 110 kV 线路来自不同的 220 kV 变电站。110 kV 变电站内 10 kV 母线设有各自投。

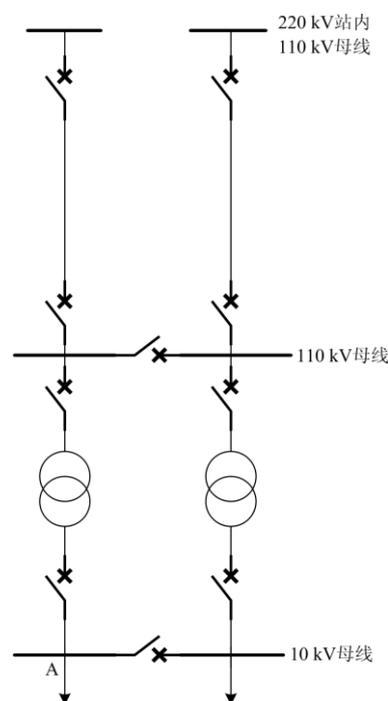


图 1 110 kV DCW 示意图

Fig. 1 110 kV DCW diagram

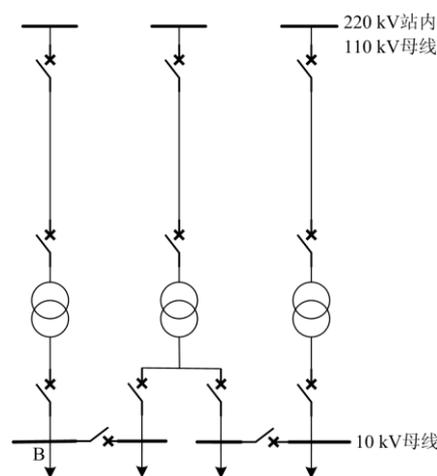


图 2 110 kV 3TW 示意图

Fig. 2 110 kV 3TW diagram

2 两种接线模式可行性指标探析

结合这两种高压配网的典型接线及其实际运行机理, 重点借鉴故障模式后果分析法^[22]以及网络等值法^[17]的理念, 寻求用解析法来求解两种典型接线方式下 A、B 两点处可靠性相关指标。

为方便表述, 将作为分段开关的断路器称为分段开关, 其他断路器开关仍称断路器。则每个元件属于集合 $\Omega = \{\text{母线、断路器、线路、变压器、分段}\}$

开关}。不同类节点具有不同的属性。对应母线的节点属性为{母线|故障率 λ , 修复时间 r }；对应断路器的节点属性为{断路器|故障率 λ , 修复时间 r }；对应线路的节点属性为：{线路|故障率 λ , 修复时间 r }；对应变压器节点属性为：{变压器|故障率 λ , 修复时间 r }；对应分段开关的节点属性为：{分段开关|自投成功概率 p_b , 故障率 λ , 修复时间 r }。为表述方便，下文中的故障率、修复时间等都与元件节点编号相对应。

除了同塔双回线路外，其他元件运行状态两两相互独立；如果线路采用单回路建设或者电缆敷设，一般可以认为所有元件运行状态均两两独立。由于同塔双回线路在实际运行过程中因同一原因同时强迫停运时有发生，也就是说同塔双回线路的运行状态不是完全独立的，线路与其他元件的运行状态仍然相互独立。结合网络拓扑结构，同塔双回线路同时强迫停运相当于直接中断对下级电网的供电，DCW 网络等值如图 3 所示。因此，可以将此类强迫停运在等值网络上用虚拟元件 2 来代表，而线路非同时强迫停运仍按元件的结构顺序维持在原拓扑结构中(如元件 4、7)，与之相对应，把线路故障率拆分成两部分：导致同塔双回线路同时强迫停运的故障率，以及单回线路单独故障的故障率。3TW 网络等值如图 4 所示。

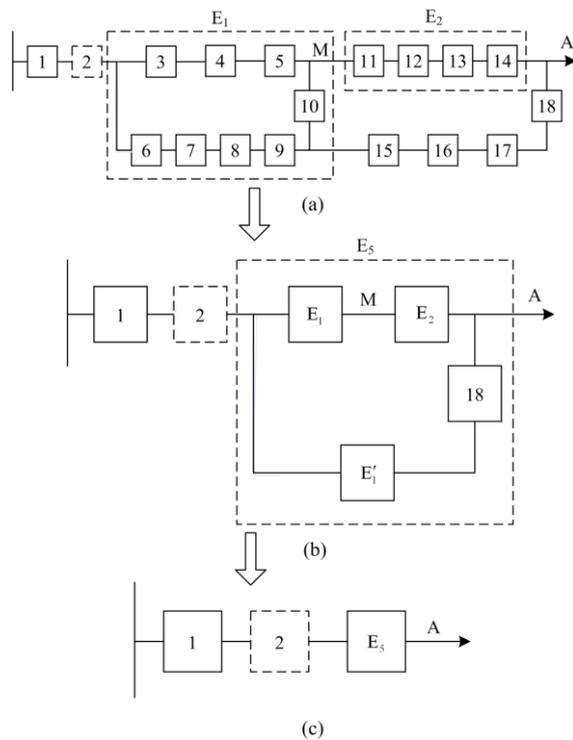


图 3 DCW 网络等值示意图

Fig. 3 Equivalent schematic diagram of DCW network

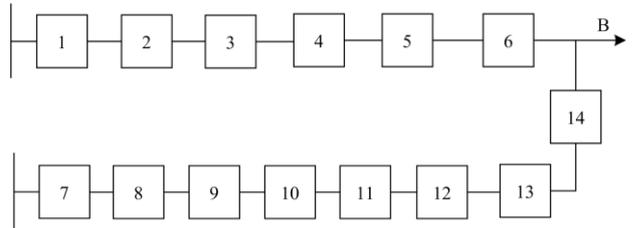


图 4 3TW 网络等值示意图

Fig. 4 Equivalent diagram of 3TW network

本文选取图 1、图 2 中 A、B 两点即两种接线所对应的 10 kV 母线处的可靠性水平来进行比较研究。考虑到两种接线方式 10 kV 母线故障所产生的效果都是一样的，本文主要是分析两类接线的相对可靠性，为简化处理，本文不考虑 10 kV 母线故障。

DCW 系统可以看成由多个元件组成，对于图 1 中的 A 点而言，影响其可靠性水平的主要元件及其拓扑关系可从图 3 看出，把一个 220 kV 系统用元件 1 来表示，元件 2 为同时强迫停运的同塔双回线路，元件 3、5、6、8、12、14、15、17 为断路器，元件 4、7 为非同时强迫停运的单回线路，元件 9 为 110 kV 变电站右侧母线，元件 10 为 110 kV 变电站分段开关，元件 11 为变电站 110 kV 左侧母线，元件 13、16 为变压器，元件 18 为 10 kV 备自投开关。每个元件有自己的属性，元件与元件之间的连线只代表拓扑连接关系，不具有其他属性，图 4 类同。

对于图 2 中的 B 点而言，影响其可靠性水平的主要元件及其拓扑关系可从图 4 看出。元件 1、7 为两个独立的 220 kV 系统，元件 2、4、6、8、10、12、13 为断路器，元件 3、9 为线路，元件 5、11 为变压器，元件 14 为 10 kV 备自投开关。

本文主要研究 A、B 两点处可靠性相关数据，如对以上两简化等值后的系统进行可靠性评估，一般可用方法有状态空间方程法、网络等值法(解析法)。电力系统是一可修复系统， $X(t)$ 表示 t 时刻系统状态，一般来讲 $\{X(t), t \in T\}$ 是一马尔科夫过程，每个元件的寿命修复时间都服从指数分布。对于 n 个元件组成的系统，共有 2^n 个状态。对于图 3(a)来说，如果直接通过状态空间方程来求解系统可靠性参数，则系统状态空间有 2^{19} 个，状态转移矩阵将十分庞大，用此方法求解显然不太现实。即使虚线框 E_1 内所包含的元件数也有 8 个，其状态空间为 2^8 个，显然也不适合用状态转移矩阵方程来求解。

不考虑元件独立工作状态下的二重及以上故障。对图 1 来讲，当元件 3~5 有故障发生时，元件 6~9 为正常工作状态，因此就虚线框 E_1 来讲，对 M 点的可靠性参数的影响主要取决于元件 10 的备自

投能否正常工作, 即如果元件 3~5 中有故障发生, 元件 10 备自投正常投运, 则就 E_1 部分来讲对 M 点电力供应不受影响。同样道理, 当元件 11~14 有故障发生时, 元件 15~17 为正常工作状态, 图 1 中用 E_1 代表这一通道内的等效元件, 包含但不限于元件 15~17。

虚线框 E_1 内对 M 点而言的等效可靠性参数为

$$\lambda_{E_1} = \sum_{i=3}^5 \lambda_i (1 - p_{10b}) \quad (1)$$

$$U_{E_1} = \sum_{i=3}^5 \lambda_i r_i (1 - p_{10b}) \quad (2)$$

$$r_{E_1} = \frac{U_{E_1}}{\lambda_{E_1}} = \frac{\sum_{i=3}^5 \lambda_i r_i (1 - p_{10b})}{\sum_{i=3}^5 \lambda_i (1 - p_{10b})} = \frac{\sum_{i=3}^5 \lambda_i r_i}{\sum_{i=3}^5 \lambda_i} \quad (3)$$

式中: λ_{E_1} 为虚线框 E_1 的等效故障率; U_{E_1} 为等效停电时间; r_{E_1} 为等效故障修复时间; p_{10b} 为元件 10(即母线开关)备自投正常投运的概率。

$$\lambda_{E_2} = \sum_{i=11}^{14} \lambda_i \quad (4)$$

$$U_{E_2} = \sum_{i=11}^{14} \lambda_i r_i \quad (5)$$

$$r_{E_2} = \frac{U_{E_2}}{\lambda_{E_2}} = \frac{\sum_{i=11}^{14} \lambda_i r_i}{\sum_{i=11}^{14} \lambda_i} \quad (6)$$

式中: λ_{E_2} 为虚线框 E_2 的等效故障率; U_{E_2} 为等效停电时间; r_{E_2} 为等效故障修复时间。

$$\lambda_{E_3} = (\lambda_{E_1} + \lambda_{E_2})(1 - p_{18b}) \quad (7)$$

$$U_{E_3} = (U_{E_1} + U_{E_2})(1 - p_{18b}) \quad (8)$$

$$r_{E_3} = \frac{U_{E_3}}{\lambda_{E_3}} = \frac{U_{E_1} + U_{E_2}}{\lambda_{E_1} + \lambda_{E_2}} \quad (9)$$

式中: λ_{E_3} 为虚线框 E_3 的等效故障率; U_{E_3} 为等效停电时间; r_{E_3} 为等效故障修复时间; p_{18b} 为元件 18(即 10 kV 母线开关)备自投正常投运的概率。

$$\lambda_A = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{E_3} \quad (10)$$

$$U_A = \lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2 + (U_{E_1} + U_{E_2})(1 - p_{18b}) \quad (11)$$

$$r_A = \frac{U_A}{\lambda_A} = \frac{\lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2 + (U_{E_1} + U_{E_2})(1 - p_{18b})}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{E_3}} \quad (12)$$

式中: λ_A 为系统对 A 点而言的故障率(强迫停运率); U_A 为 A 点的年故障停电时间(强迫停运时间); r_A 为 A 点的平均修复时间。

对图 4 而言, 1~6 元件, 7~14 元件均运行状态两两独立, 则当元件 1~6 都正常工作时 B 点为正常供电状态, 当元件 1~6 中出现一个元件故障, B 点状态是否正常取决于元件 14 即备自投开关是否正常动作, 因此可得 B 点可靠性相关的一组公式为

$$\lambda_B = \sum_{i=1}^6 \lambda_i (1 - p_b) \quad (13)$$

$$U_B = \sum_{i=1}^6 \lambda_i r_i (1 - p_b) \quad (14)$$

$$r_B = \frac{U_B}{\lambda_B} = \frac{\sum_{i=1}^6 \lambda_i r_i (1 - p_b)}{\sum_{i=1}^6 \lambda_i (1 - p_b)} = \frac{\sum_{i=1}^6 \lambda_i r_i}{\sum_{i=1}^6 \lambda_i} \quad (15)$$

式中: λ_B 为系统对 B 点而言的故障率(强迫停运率); U_B 为 B 点的年故障停电时间(强迫停运时间); r_B 为 B 点的平均修复时间。

3 实例计算

根据国家能源局可靠性中心发布的可靠性年度报告 2016、2017 年相关数据, 整理出 220 kV 架空线、变压器、断路器、母线的有关数据如表 1 所示。

表 1 220 kV 设备元件可靠性参数

Table 1 Reliability parameters of 220 kV equipment components

类别	强迫停运率/ (次/百公里·(台、段)·年)	强迫停运平均修复 时间/(h/次)
架空线路	0.08	13
变压器	0.2	32
断路器	0.12	15
母线	0.2	—

110 kV 设备元件可靠性参数如表 2 所示。由于可靠性中心发布的数据中没有 110 kV 电网的相关数据, 从运行经验看 110 kV 电网变压器、断路器、母线的故障率与 220 kV 电网差异不大, 这几类设备的故障率不妨拿来作为 110 kV 电网这几类设备的故障率; 110 kV 架空线路建设标准略低于 220 kV 架空线路, 运行环境比 220 kV 线路略差, 将 110 kV 架空线路的故障率取为 0.1 次/百公里·年; 110 kV 设备强迫停运的平均修复难度低于 220 kV 设备, 220 kV 各类设备的强迫停运平均修复时间乘以 0.8 作为 110 kV 各类设备的强迫停运平均修复时间; 可靠性中心没有发布母线的强迫停运修复时间的相关数据, 这里取 12 h 作为 110 kV 母线强迫停运平均修复时间。另外, 220 kV 变电站全站失压按 0.5 次/百站·年来考虑。

线路长度取 10 km, 同塔双回同时故障占所有

线路故障的比例取 40%，即图 3 中元件 2 的故障率为 0.004 次/年，元件 4 的故障率取为 0.006 次/年，即图 4 中元件 3 的故障率取为 0.01 次/年；110 kV、10 kV 母线备自投正确动作率均取为 99.9%。

基于以上参数，利用式(1)一式(12)分别计算四种方案的可靠性对比案例如表 3 所示，并得到两种典型接线方式(图 1 中 A 点和图 2 中 B 点)的可靠性指标对比如表 4 所示。

表 2 110 kV 设备元件可靠性参数

Table 2 Reliability parameters of 110 kV equipment components

类别	强迫停运率/ (次/百公里 (台、段)年)	强迫停运平均 修复时间/ (h/次)
架空线路	0.1	10
变压器	0.2	26
断路器	0.12	12
母线	0.2	12
220 kV 变电站	0.5	12

表 3 对比案例

Table 3 Comparative cases

编号	方案
C1	母线备自投正确动作率 99.9%，同塔双回架设
C2	母线备自投正确动作率 99.9%，单回架空裸导线
C3	母线备自投正确动作率 99.9%，单回架空电缆
C4	母线备自投正确动作率 99.5%，同塔双回架设

表 4 可靠性指标对比

Table 4 Comparison of reliability indices

方案/指标		故障率	年故障停电时间	平均停电时间
		λ /(次/年)	U /(h/年)	r /h
C1	A	0.009 006 4	0.100 104 9	11.11
	B	0.000 022 6	0.000 279 2	12.35
C2	A	0.005 006 4	0.060 104 9	12.01
	B	0.000 022 6	0.000 279 2	12.35
C3	A	0.005 006 4	0.060 104 8	12.01
	B	0.000 010 6	0.000 155 2	14.64
C4	A	0.009 032 2	0.100 526 2	11.13
	B	0.000 103 0	0.001 276 0	12.39

观察方案 C1 的可靠性指标可见，两种接线方式的故障率和年故障停电时间相差了 3 到 4 个数量级，DCW 的年故障停电时间为 3TW 的 645 倍，但即便如此，其相应的供电可靠性仍达到了 99.998%。因此，两种接线方式的供电可靠性均能满足工程的要求。方案 C2 将 DCW 的架空线路改为单回路架设，则图 3 中线路元件运行状态也是相互独立的，在图 3 中元件 2 的故障率就应该取为 0，线路元件 4 的故障率用表 2 中的数据，取为 0.01 次/年，由表

4 可见，可靠性显著提高。方案 C3 将 110 kV 架空线路全部改为电缆线路，则线路元件运行状态也是相互独立的，并且根据国家可靠性中心发布的数据，2016、2017 年电缆故障率为 0。与 C2 相比，DCW 的可靠性指标没有变化，而 3TW 的可靠性指标则变化较明显，这是因为前者设有 110 kV 母线，在备自投的作用下，两回进线可互为备用，单回路故障并不影响供电。

方案 C4 考虑备自投装置正确动作率为 99.5%，与方案 1 比较可见，3TW 对备自投装置的正确投运率的敏感度要远高于 DCW 对正确投运率的敏感度。其实，由式(1)一式(12)也可以看出， λ_B 、 U_B 对备自投装置的正确投运率比较敏感，提高备自投装置的正确动作率对 3TW 的 110 kV 变电站 10 kV 母线处供电可靠性指标改善影响非常明显。

设备故障率对不可用率的影响如图 5 所示，可知采用同塔双回架空线的 DCW 和 3TW 的供电可靠性受上级电源和设备故障率影响的变化情况。对同塔双回架空线的 DCW 而言，上级电源的可靠性对其影响最大，其次是架空线，而变压器、断路器和母线对供电可靠性的影响微乎其微，主要原因在于 110 kV 母线和 10 kV 母线的备自投使得两个间隔的设备可以互为备用。而 110 kV 架空线的影响主要来自同塔线路的同时故障，若采用单回路架设，

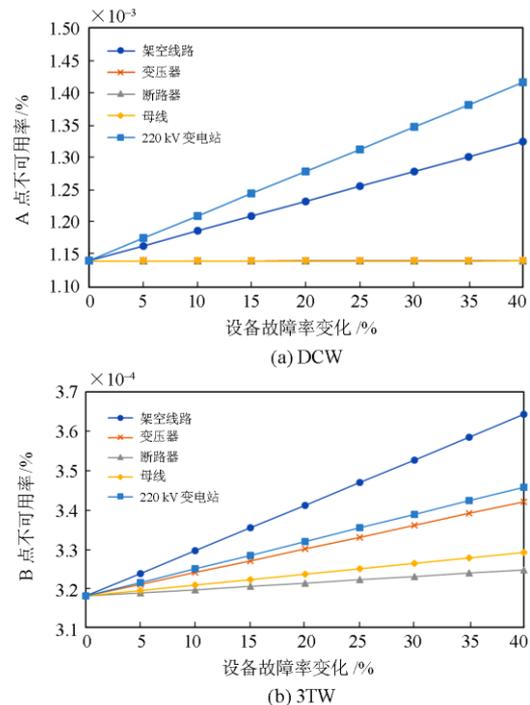


图 5 设备故障率对不可用率的影响

Fig. 5 Impact of equipment fault rate on unavailability

则架空线也将与主变等类似,并非可靠性的敏感设备。对于 3TW 而言,供电可靠性的主要敏感设备是 110 kV 架空线,其次是上级电源和主变。因此,除去上级电源的影响外,这两种接线方式的可靠性关键影响因素都在于线路,可采取针对性的运维方式以保障可靠性。

以典型设计的一般综合造价为基础,两种典型接线的经济性和可靠性综合对比如表 5 所示。考虑特大城市中 110 kV 变电站均为 GIS 站,双变的综合造价为 6 000 万元/站,三主变的综合造价为 7 200 万元/站,110 kV 单回架空线单位综合造价为 100 万元/公里,双回架空线单位综合造价为 160 万元/公里,电缆单位综合造价为 500 万元/公里,线路平均长度 10 公里,以单台主变(容量设为 50 MW)为基准,可计算得到两种典型接线方式的单变容量造价;同时,假设主变平均负载率为 60%,各段母线负荷均分,则可得到单变容量下的年期期望损失电量及相应的不可用率。显然,3TW 架空进线的经济性和可靠性均是最佳的,但其受限于变电站站址的需求;其次,DCW 不管采用单回或双回,其经济性及可靠性均比较接近,工程上可能更多的需要考虑线路走廊的需求;而采用电缆进线的方式则成本是最昂贵的,单变容量的综合造价翻倍,只有在线路走廊异常困难的情况下才建议采用。

表 5 两种典型接线的经济性和可靠性综合对比

Table 5 Comparison of economy and reliability of the two typical connections

接线		单变容量的 综合造价*/ 万元	单变容量的 年期期望损失 电量*/MW	不可用率/%
双 链 式	双回同塔	3 800	3.003	1.14×10^{-3}
	单回架空	4 000	1.803	6.86×10^{-4}
	电缆	8 000	1.803	6.86×10^{-4}
3T	架空	3 400	0.008	3.19×10^{-6}
	电缆	7 400	0.005	1.77×10^{-6}

*注:此处单变容量的指标是指全站总指标除以主变台数得到相对值。

4 结论

(1) 无论是 DCW 还是 3TW,在 110 kV 变电站 10 kV 母线处的供电可靠性指标都令人满意,选择这两者来建设的电网结构都能满足实际运行需要。

(2) 采用电缆还是架空线路对 DCW 的可靠性指标几乎没有影响,但电缆线路对 3TW 可靠性指标的改善贡献明显。

(3) 对于同塔双回的 DCW,如果对供电可靠性要求高的城市电网,建议和其他 220 kV 变电站之间建设 110 kV 联络线,以提高 110 kV 变电站 10 kV

母线处供电可靠性指标。

(4) 相比于 DCW,3TW 对于各自投装置的正确动作率更为敏感,采用 3TW 的城市电网,要加强对变电站 10 kV 各自投装置维护管理。

(5) 对于采用同塔架空线的 DCW 和 3TW,影响供电可靠性指标的主要敏感设备是上级电源和线路,运行时需加强线路运维。

(6) 采用架空进线的 3TW 的经济性和可靠性均是最佳的,但受限于变电站站址的需求;其次是采用架空进线的 DCW,不管单回架设或同塔双回架设,其经济性及可靠性均比较接近,工程上可能更多的需要考虑线路走廊的需求;而采用电缆进线的方式则成本是最昂贵的,单位容量的综合造价翻倍,只有在线路走廊异常困难的情况下才建议采用。

参考文献

- [1] 彭卉,曾锐,杜飘,等.考虑各自投配置策略的城市高压配网典型接线可靠性分析[J].自动化与仪器仪表,2017(8):189-193.
PENG Hui, ZENG Rui, DU Piao, et al. Reliability analysis of typical wiring of urban high voltage distribution network considering standby auto-allocation strategy[J]. Automation & Instrumentation, 2017(8): 189-193.
- [2] 徐斌,马骏,陈青,等.基于改进 AHP-TOPSIS 法的经济开发区配电网综合评价指标体系和投资策略研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(22):35-44.
XU Bin, MA Jun, CHEN Qing, et al. Research on comprehensive evaluation index system and investment strategy of economic development zone distribution network based on improved AHP-TOPSIS method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 35-44.
- [3] 和敬涵,邓晓洋,苗友忠,等.考虑高压配网接线方式的综合电网可靠性评估[J].电网技术,2017,41(4):192-200.
HE Jinghan, DENG Xiaoyang, MIAO Youzhong, et al. Comprehensive power grid reliability assessment considering high-voltage distribution network wiring[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 192-200.
- [4] 夏成军,代文良,邱桂华,等.提高 110 kV 电网供电可靠性的重合闸方式研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(11):133-137.
XIA Chengjun, DAI Wenliang, QIU Guihua, et al. Study on the way of reclosing to improve 110 kV grid power supply reliability[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 133-137.
- [5] 唐俊熙,王梓耀,张俊潇,等.基于文化蚁群算法的高可靠多电源配电网规划模型[J].电力系统保护与控制,2020,48(7):99-107.
TANG Junxi, WANG Ziyao, ZHANG Junxiao, et al. High reliability multi power distribution network planning model based on cultural ant colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 99-107.
- [6] SARANTAKOS I, GREENWOOD D M, YI J, et al. A

- method to include component condition and substation reliability into distribution system reconfiguration[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2019, 109: 122-138.
- [7] 王印忠. 高压配电网典型接线形式及适应性[J]. *农村电气化*, 2017(1): 8-9.
WANG Yinzhong. Typical connection forms and adaptability of high voltage distribution network[J]. *Rural Electrification*, 2017(1): 8-9.
- [8] 程一鸣, 赵志辉, 王天华. 城市 110 kV 高压配电网接线方式研究[J]. *电网技术*, 2008, 32(增刊 2): 113-115.
CHENG Yiming, ZHAO Zhihui, WANG Tianhua. Research on wiring methods of urban 110 kV high voltage distribution network[J]. *Power System Technology*, 2008, 32(S2): 113-115.
- [9] 许可, 鲜杏, 程杰, 等. 城市高压配电网典型接线的可靠性经济分析[J]. *电力科学与工程*, 2015, 31(7): 12-18.
XU Ke, XIAN Xing, CHENG Jie, et al. Reliability economic analysis of typical connections of urban high voltage distribution network[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2015, 31(7): 12-18.
- [10] 刘杰. 城市配电网可靠性评估的经济性优化研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017.
LIU Jie. Study on economic optimization of reliability evaluation of urban distribution network[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2017.
- [11] 陈恩泽, 黄建波, 叶雪峰, 等. 淮安地区高压配电网目标网架规划研究[J]. *江苏电机工程*, 2016, 35(4): 76-79.
CHEN Enze, HUANG Jianbo, YE Xuefeng, et al. Study on target grid planning of high voltage distribution network in Huai'an area[J]. *Jiangsu Electric Engineering*, 2016, 35(4): 76-79.
- [12] 郑亮礼. 电网布局模型及网架组合优化研究[J]. *智能电网*, 2015, 3(3): 235-238.
ZHENG Liangli. Study on grid layout model and grid combination optimization[J]. *Smart Grid*, 2015, 3(3): 235-238.
- [13] ANAND M P, BAGEN B, RAJAPAKSE A. Probabilistic reliability evaluation of distribution systems considering the spatial and temporal distribution of electric vehicles[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2020, 117.
- [14] BATTU N R, ABHYANKAR A R, SENROY N. Reliability compliant distribution system planning using Monte Carlo simulation[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2019, 47: 11-12.
- [15] 侯雨伸, 王秀丽, 刘杰, 等. 基于拟蒙特卡罗方法的电力系统可靠性评估[J]. *电网技术*, 2015, 39(3): 744-750.
HOU Yushen, WANG Xiuli, LIU Jie, et al. Power system reliability evaluation based on Quasi-Monte Carlo method[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(3): 744-750.
- [16] ZHANG Tianyu, WANG Chengshan, LUO Fengzhang, et al. Analytical calculation method of reliability sensitivity indexes for distribution systems based on fault incidence matrix[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2020, 8(2): 325-333.
- [17] 万国成, 任震, 田翔. 配电网可靠性评估的网络等值法模型研究[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(5): 48-52.
WAN Guocheng, REN Zhen, TIAN Xiang. Research on network equivalence model of distribution network reliability evaluation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(5): 48-52.
- [18] 咎贵龙, 王主丁, 李秋燕, 等. 基于状态空间截断和隔离范围推导的高压配电网可靠性评估[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(13): 79-85.
MIN Guilong, WANG Zhuding, LI Qiuyan, et al. Reliability evaluation of high voltage distribution network based on state space truncation and isolation range[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(13): 79-85.
- [19] 黄廷城, 叶琳浩, 张勇军. 基于 AHP-熵权法的配电网用电可靠性综合评估[J]. *广东电力*, 2018, 31(1): 44-50.
HUANG Tingcheng, YE Linhao, ZHANG Yongjun. Comprehensive evaluation on electricity consumption reliability of power distribution network based on AHP-Entropy weight method[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(1): 44-50.
- [20] WANG Y. Analytical complex distribution system reliability evaluation considering stochastic interruption durations and network reconfigurations[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2017, 45(19): 2151-2163.
- [21] JAIN T, GHOSH D, MOHANTA D K. Augmentation of situational awareness by fault passage indicators in distribution network incorporating network reconfiguration[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(4): 323-336. DOI: 10.1186/s41601-019-0140-6.
- [22] 王枫, 祁彦鹏, 傅正财. 基于改进故障模式与后果分析法的配电网可靠性评估[J]. *低压电器*, 2013(1): 37-41.
WANG Feng, QI Yanpeng, FU Zhengcai. Distribution network reliability evaluation based on improved failure mode and consequence analysis method[J]. *Low Voltage Apparatus*, 2013(1): 37-41.

收稿日期: 2020-06-19; 修回日期: 2020-08-25

作者简介:

万国成(1970—), 男, 通信作者, 博士, 高工, 主要研究方向为电网规划、电力系统可靠性研究与优化;

E-mail: wangc@gdgc.csg.cn

邓丰强(1986—), 男, 硕士, 实验师, 主要研究方向为智能电网与能源互联网的运行与控制; E-mail: epfqdeng@scut.edu.cn

张勇军(1974—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统运行与规划, 互联网+智慧能源等。E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

(编辑 魏小丽)