

# 中压配电网不同接线模式经济性和可靠性分析

王成山<sup>1</sup>, 王赛一<sup>1</sup>, 葛少云<sup>1</sup>, 谢莹华<sup>1</sup>, 尹页秀<sup>1</sup>, 林瑞兴<sup>2</sup>

(1. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津市 300072; 2. 福建省电力勘测设计院, 福建省福州市 350000)

**摘要:** 在不同供电区域负荷密度和不同变电所容量条件下, 对中压配电网常见的几种接线模式进行了经济性和可靠性计算分析, 研究其随负荷密度和变电所容量变化的趋势, 以及在相同条件下不同接线模式之间的比较。基于定量计算结果, 经综合考虑, 给出了有指导意义的建议方案: 在可靠性要求很高的区域例如城市繁华中心区, 建议采用电缆接线的不同母线环网接线(三座开闭所)模式或不同母线出线连接开闭所接线模式; 在可靠性要求较高的区域例如一般城区等, 建议采用电缆接线的不同母线出线的环式接线模式或架空接线的三分段三联络接线模式; 在可靠性要求不是很高的地区例如城郊等, 建议采用架空接线的不同母线出线的环式接线模式或不同母线三回馈线的环式接线模式。

**关键词:** 中压配电网; 接线模式; 经济性; 可靠性

**中图分类号:** TM727.2; TM732

## 0 引言

配电工程投资巨大, 发达国家输配电工程投资常常占整个电力系统投资的 50%以上, 而在各区域(或城市)电力公司中配电系统投资通常占预算的 60%。在我国, 过去几十年缺电的困扰导致了电力建设存在“重发, 轻供, 不管用”的偏向, 配电网长期缺乏合理的规划与资金投入, 致使近年呈现出有电“送不进、落不下、用不上”的矛盾, 阻碍了国民经济的发展和人民生活质量的提高。同时, 我国输配电系统目前线损率很高, 1995 年为 8.77%, 1997 年为 8.20%, 配电系统网损尤为严重, 而日本、德国、法国等国家线损率仅为 5.6%左右。按 1997 年配电系统网损水平, 我国相当于比国外多损耗 180 亿 kW·h 的电量, 相当于损失 3 个到 4 个百万 kW 级电厂的全年发电量<sup>[1,2]</sup>。

为了改善我国配电系统的现状, “八五”以来输配电工程投资已提高到整个电力系统投资的 31.5%。仅 1998 年至 2000 年, 国家就投资几千亿元进行一批城市的配电网改造。

今后, 配电网的改造还将继续扩大和深化。面对未来巨大的资金投入, 如何既考虑当前的需要和可能, 又惠及长远的发展, 合理有效地利用资金和资源, 取得最大的效益, 避免浪费, 乃是各级决策者应该十分关注的问题。

10 kV 配电网作为城市中压电网中的主要部分, 其地位十分重要。为了实现电网的安全、经济运

行, 并达到接线方式的标准化、统一化要求, 有必要在不同的负荷密度下, 针对不同的 110 kV/10 kV 变电所容量, 进行 10 kV 网架研究, 以便为电网的规划、运行人员提供有益的参考。

## 1 10 kV 配电网接线模式及技术经济分析

### 1.1 10 kV 配电网接线模式分析

10 kV 中压配电网由高压变电所的 10 kV 配电装置、开关所、配电所和架空线路或电缆线路等部分组成, 其功能是将电力安全、可靠、经济、合理地分配到用户<sup>[3]</sup>。

一般说来, 城市的配电网由架空线和电缆线混合组成<sup>[1]</sup>。在研究一个特定的供电区域内的 10 kV 配电网的网络结构时, 采取架空线路和电缆线路分开进行研究的方法, 这样也不失一般性。

考虑到实际可行性, 在研究供电区域内架空线的接线模式时, 我们研究了 4 种具有代表性的接线模式, 即单电源线辐射接线、不同母线出线的环式接线、不同母线三回馈线的环形接线以及三分段三联络接线, 分别见图 1(a)~图 1(d)。

由于不同母线出线的环式接线和不同母线三回馈线的环形接线在线路裕量及负荷转移能力上相同, 因而将其统一分析。在研究供电区域内的电缆线路的接线模式时, 我们研究了 4 种具有代表性的接线模式, 即单电源线辐射接线、不同母线出线的环式接线、不同母线出线连接开闭所接线以及不同母线环网接线(三座开闭所), 分别见图 1(e)~图 1(h)。

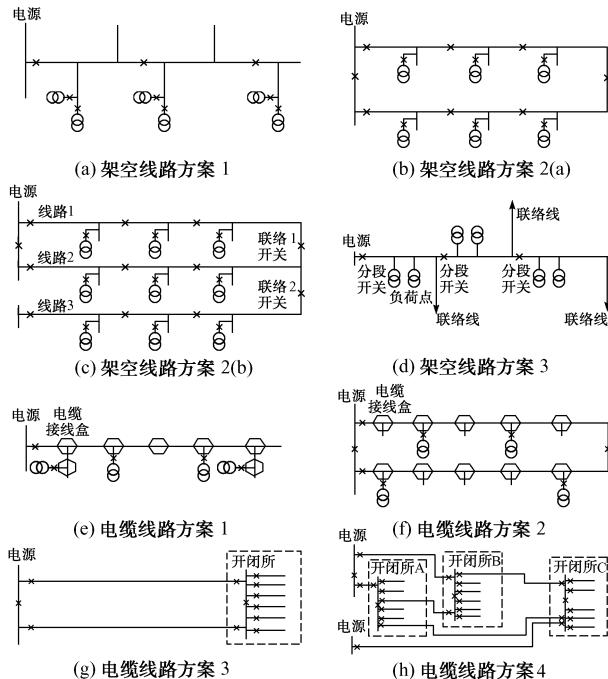


图 1 10 kV 配电网架空线路和电缆线路接线模式  
Fig. 1 Line and cable connection modes in 10 kV distribution network

## 1.2 10 kV 配电网技术经济分析

由于配电网是直接面向用户的,所以在实际分析时认为配电网由若干小区组成,且每个小区都由110 kV 配电站、10 kV 线路、开关设备等构成;同时,为了研究方便,认为每个小区都是以110 kV 配电站为中心、以配电站的供电半径为半径的圆形供电区域。对10 kV 配电网的技术经济分析,主要是比较经济性和可靠性两方面的内容<sup>[4]</sup>。经济性的分析思路主要是:将110 kV 配电站综合投资和10 kV 出线的投资按等年值法折算到年值,再加上110 kV 配电站的年运行费用和10 kV 出线的年线损,然后按单位负荷年费用来比较不同方案的投资大小。可靠性的分析思路主要是:对各个不同方案,考虑每个元件出现的平均年故障率及每个元件出现故障时受影响的用户数和平均修复时间,同时考虑某些方案可以转移负荷的情况,然后算出平均用电有效度,用该指标比较不同方案的可靠性高低。虽然是理想情况,但由于配电系统技术经济分析一般都具有统计规律,所以得到的结论同样适用于实际配电系统。

图2(a)~图2(d)分别给出了结合第1节所述的各种接线模式中的几个供电方案图:单电源线辐射接线的供电方案(架空线或电缆)、三分段三联络接线的供电方案(架空线)、不同母线出线连接开闭所接线的供电方案(电缆)、不同母线环网接线(三开闭所)的供电方案(电缆)。

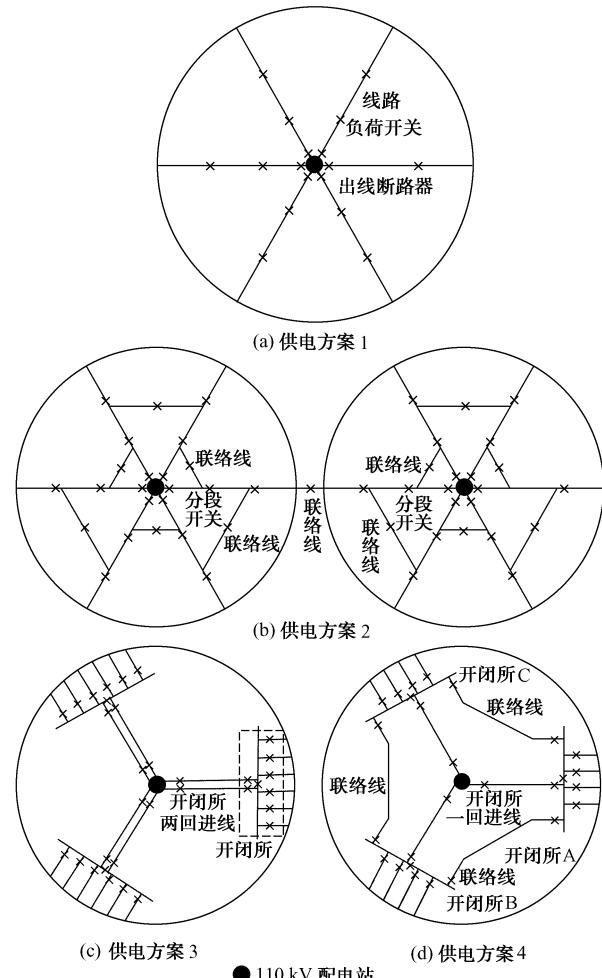


图 2 10 kV 配电网供电方案  
Fig. 2 Different power supply projects of 10 kV distribution network

## 2 中压配电网经济性分析

配电方案经济性计算的基本思路是:在不同负荷密度下,对于每一个110 kV 变压器容量和台数组合,确定变电所的供电区域,再在这个供电区域内考虑几种实际可行的10 kV 架空线和电缆线网架结构,并对每一种方案计算其单位负荷年费用,最后根据各种方案的单位负荷年费用的大小来判定其经济性。

在具体进行计算时,参考供电方案图,需要对每一个选定的供电区域进行配电站、线路和其他配电装置的投资费用计算。计算时同时考虑线路损耗和变压器损耗等运行费用,可分别得到变电站费用和线路费用,然后按“现值转年值”法<sup>[5]</sup>,转化为变电站年费用和线路年费用,两者相加再除以该方案中变电所的最大负荷,最后得到该配电方案的单位负荷年费用值。

## 2.1 变电所经济计算比较方法

变电所费用由变电所综合投资费用、变电所运行费用两部分构成。总费用计算完毕后,再采用“现值转年值”法,转化为年费用,最后用最小年费用法进行比较。

变电所综合投资  $Z_s$  主要包括变压器综合投资、配电装置综合投资以及不可预见的附加投资等。

变电所年运行费用  $U_s$ (单位为万元)主要包括一年中变压器的电能损耗费及检修、维护费等,即:

$$U_s = \alpha \Delta A_s \times 10^{-4} + U_{s1}$$

式中: $U_{s1}$ 为变电所检修、维护费(单位为万元); $\alpha$ 为电能电价,取 0.41 元/(kW·h); $\Delta A_s$ 为变电所全年电能损失总值(单位为 kW·h)。

进行经济比较时一般采用动态经济比较法,该方法的主要依据是基于货币的经济价值是随时间而改变的,各种费用的支付时间不同,发挥的效益也不同。所以,对几个方案进行比较时,必须在同等可比的基础上才能进行,例如设备供应和工程技术是现实可行的、各方案必须采用同一时间的价格指标以及经济计算年限应相同等。我国电力工业推荐采用“最小年费用法”进行动态经济比较<sup>[5]</sup>。其计算公式为:

$$F_{ns} = Z_s \left[ \frac{r_0(1+r_0)^{n_s}}{(1+r_0)^{n_s} - 1} \right] + U_s$$

式中: $F_{ns}$ 为平均分布在  $n$  年内的变电所年费用; $Z_s$ 为变电所综合投资; $n_s$ 为变电所的经济使用年限,取 25 年; $r_0$ 为电力工业投资回收率,现阶段取 0.1。

## 2.2 线路经济计算比较方法

线路的费用构成与变电所相似,由综合投资费用、运行费用两部分构成。总费用计算完毕后,再采用“现值转年值”法,转化为年费用。

线路投资费用  $Z_L$  主要是指线路的综合投资。架空线路的投资费用主要是变电所的出线投资,而电缆线路的投资费用则还应加上开闭所的投资和开闭所出线投资。

线路年运行费用  $U_L$ (单位为万元)主要包括一年中线路的电能损耗费及检修、维护费等,即:

$$U_L = \alpha \Delta A_L \times 10^{-4} + U_{L1}$$

式中: $U_{L1}$ 为线路检修、维护费(单位为万元); $\Delta A_L$ 为线路全年电能损失总值(单位为 kW·h)。

进行线路经济比较时,与变电所的经济比较方法一样,也采用动态经济比较法,其计算公式为:

$$F_{NL} = Z_L \left[ \frac{r_0(1+r_0)^{n_L}}{(1+r_0)^{n_L} - 1} \right] + U_L$$

式中: $F_{NL}$ 为平均分布在  $n$  年内的线路年费用; $Z_L$ 为线路综合投资; $n_L$ 为线路的经济使用年限,架空线路取 30 年,电缆线路取 40 年。

为了使不同变电所容量的方案具有可比性,可以采用“最小单位负荷年费用法”进行配电方案的经济性比较。因此,在计算完变电所和线路费用后,还要计算各种配电方案的单位负荷年费用值  $F_N$ :

$$F_N = \frac{F_{ns} + F_{NL}}{P}$$

式中: $P$ 为此方案中变电所的最大负荷。

$F_N$  值较小的方案在经济性上比较占优势。

## 2.3 配电网经济性计算结果分析

具体进行分析计算时,为了得到一般性规律,负荷密度(单位为 MW/km<sup>2</sup>)分别取 2.0, 5.0, 20.0, 40.0;110 kV 变电站的容量分别取 2×25.0 MVA, 2×31.5 MVA, 2×40.0 MVA, 2×50.0 MVA, 2×63.0 MVA, 3×25.0 MVA, 3×31.5 MVA, 3×40.0 MVA, 3×50.0 MVA 和 3×63.0 MVA。在此基础上,对架空线路和电缆线路的几种不同接线模式,研究其经济性随负荷密度和变电所容量的变化趋势,以及同一种负荷密度和变电所容量条件下不同接线模式之间的比较。

图 3 是显示容量为 2×25 MVA、变电所采用不同配电网接线模式时(架空线路为 3 种, 电缆线路为 4 种)的单位负荷年度费用情况。相同负荷密度下不同图案的相邻柱图代表几个不同方案的费用指标。

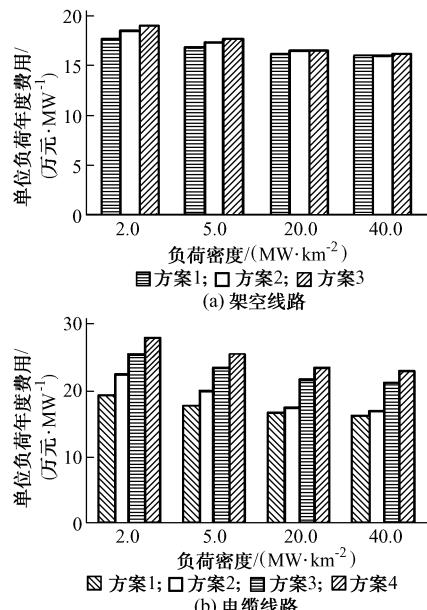


图 3 单位负荷年度费用-负荷密度曲线(示意)

Fig. 3 Curve of relation between year cost for unit load and load density

图 4 是负荷密度为 2.0 MW/km<sup>2</sup> 条件下不同配电网接线模式(架空线路为 3 种, 电缆线路为 4 种)的单位负荷年度费用情况。相邻的曲线代表几个

不同方案的费用指标。

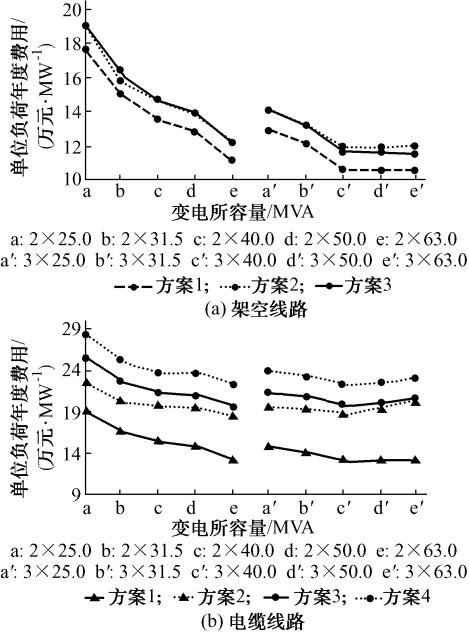


图 4 单位负荷年度费用-变电所容量曲线(示意)

Fig. 4 Curve of relation between year cost for unit load and substation capacity

从图 3 和图 4 可看出,在一定的变电所容量下,对于同一种接线模式,架空线路和电缆线路配电网的单位负荷年度费用随供电区域负荷密度的增加而下降;在一定的负荷密度下,对于同一种接线模式,其单位负荷年度费用随变电所容量的增加而降低。

另外,在同一变电所容量和负荷密度下,架空线路几种接线模式的单位负荷年度费用从低到高依次为单电源线辐射接线模式、不同母线出线的环式接线模式或不同母线三回馈线的环式接线模式、三分段三联络接线模式;电缆线路几种接线模式的单位负荷年度费用从低到高依次为单电源线辐射接线模式、不同母线出线的环式接线模式、不同母线出线连接开闭所的接线模式、不同母线环网接线(三座开闭所)模式。

### 3 中压配电网可靠性分析

可靠性是与供电质量有关的一项基本指标。评估供电可靠性的主要指标有停电频率、每次停电的持续时间以及用户在停电时自行供电所付出的代价等<sup>[6]</sup>。这些指标与各种因素有关,例如不同设备的可靠性、线路的长度及负载情况、网络的结构、配电自动化水平、负荷曲线的形态以及现有负荷转供能力等。可靠性分析用于评估系统结构的可靠性,不仅要比较可靠性的相对水平,而且还要评价提供某种特定可靠性水平所需的费用。可靠性分析也可用于制

定可靠性的方针和政策,例如确定提供给各类用户的可靠性水平或某一负荷水平所要求的可靠性水平。

#### 3.1 配电网可靠性评估的基本方法<sup>[6~10]</sup>

许多配电系统是按单一的辐射型配电系统来设计和建造的。此外,还有许多系统,它们虽按环形系统来建造,但又通过环形系统中的正常开路点,作为单一的辐射型配电系统来运行。这些正常开路点的目的就是为了减少在任何单一的配电回路中发生故障的设备的数量,以及为了保证在系统万一发生故障时或者在计划检修期间,某个正常开路点可以闭合,而另外某一个点可以打开,以使失去电源的总负荷为最小。

辐射型系统由一组串联元件包括线路、电缆、隔离开关、母线等所组成。分析计算时考虑了变压器、母线、断路器、隔离开关和线路的影响,并认为一旦设备发生故障就立刻退出运行,进行检修;一旦检修完毕,立刻投入运行。连接在系统任一负荷点的用户要求它与电源点之间的所有元件都运行,即若电源点至负荷点供电连续则为可靠。并且,认为当一台主变压器故障停运时,在考虑一定的负荷转移后,剩余变压器不过载,以及一条线路故障停运后,剩余线路不过载。基于此,平均故障率  $\lambda_s$ 、平均停运持续时间  $r_s$  和平均年停运时间  $t_s$  这 3 个可靠性参数分别为:

$$\lambda_s = \sum_i \lambda_i$$

$$r_s = \frac{t_s}{\lambda_s} = \frac{\sum_i \lambda_i r_i}{\sum_i \lambda_i}$$

$$t_s = \sum_i \lambda_i r_i$$

式中: $\lambda_i$  为给定元件  $i$  的平均故障率; $r_i$  为给定元件  $i$  的平均故障停电时间。

形成以上理论和有关公式的主要假设之一是各个元件的故障是相互独立的,元件间彼此串联。进行可靠性计算时,  $\lambda$ ,  $r$  和  $t$  所使用的基本量纲必须一致,一般,  $\lambda$  为次/年,  $r$  为 h/次,  $t$  为 h/年。

应用经典的概念算出的可靠性指标是平均故障率、平均停运持续时间和平均年停运时间这 3 个主要指标。但是,它们并不总是能完全表示系统的特性和响应。例如,不管负荷点连接的是 1 个用户还是 100 个用户,也不管负荷点的平均负荷是 10 kW 还是 100 MW,所要计算的指标都是相同的。为了反映系统停运的严重程度和重要性,一般采用平均用电有效度  $A_{SAI}$  来评估,即:

$$A_{SAI} = \frac{\text{用户用电小时数}}{\text{用户需电小时数}} = \frac{N_{\text{总}} \times 8760 - \sum t_{s_i} N_i}{N_{\text{总}} \times 8760}$$

式中:  $N_{\text{总}}$  为系统中总用户数;  $N_i$  为故障时受影响的用户数, 与平均年停运时间  $t_{S_i}$  相对应; 8 760 为 1 小时数。

### 3.2 配电网可靠性计算结果分析

具体进行分析计算时, 为了得到一般性规律, 与经济性分析一样, 负荷密度(单位为 MW/km<sup>2</sup>)分别取 2.0, 5.0, 20.0, 40.0; 110 kV 变电站容量分别取 2×25.0 MVA, 2×31.5 MVA, 2×40.0 MVA, 2×50.0 MVA, 2×63.0 MVA, 3×25.0 MVA, 3×31.5 MVA, 3×40.0 MVA, 3×50.0 MVA 和 3×63.0 MVA。在此基础上, 对架空线路和电缆线路的几种不同接线模式, 研究其可靠性随负荷密度和变电所容量的变化趋势, 以及同一种负荷密度和变电所容量条件下不同接线模式之间的比较。

图 5 给出了容量为 2×25.0 MVA 变电所采用不同的配电网接线模式时(架空线路为 3 种, 电缆线路为 4 种)的可靠性指标情况, 相同负荷密度下不同图案的相邻柱图代表几个不同方案的可靠性指标。

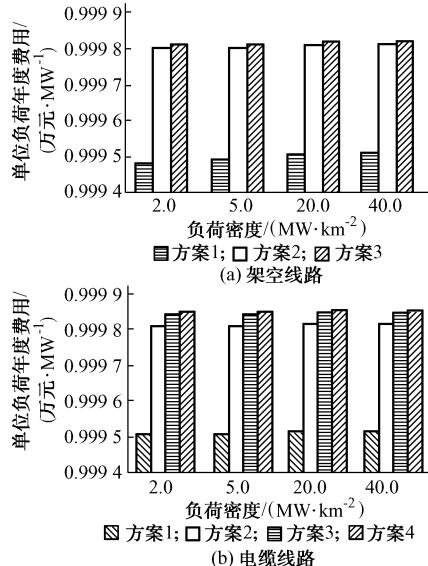


图 5 可靠性指标-负荷密度曲线(示意)

Fig. 5 Curve of relation between reliability and load density

图 6 是在负荷密度为 2.0 MW/km<sup>2</sup> 条件下, 不同的配电网接线模式(架空线路为 3 种, 电缆线路为 4 种)的可靠性指标情况, 相邻的曲线代表几个不同方案的可靠性指标。

从图 5 和图 6 的结果及进一步的分析可知, 在一定的变电所容量下, 对于同一种接线模式, 架空线路和电缆线路配电网的可靠性随供电区域负荷密度的增加而增加; 在一定的负荷密度下, 对于同一种接线模式, 其可靠性随变电所容量的增加而降低。

另外, 在同一变电所容量和负荷密度下, 架空线

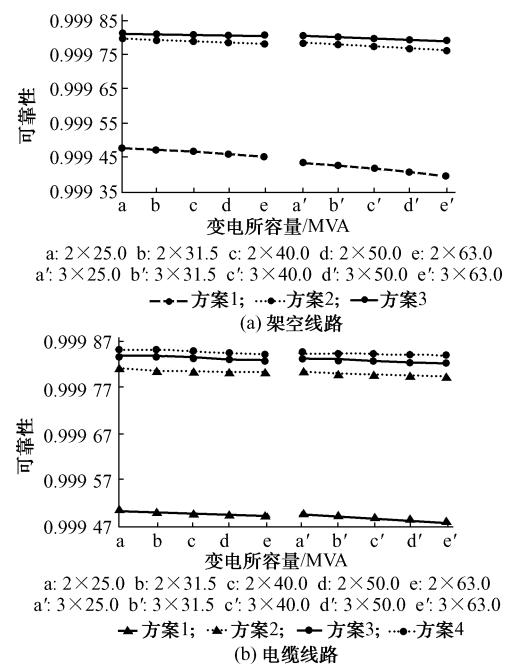


图 6 可靠性指标-变电所容量曲线(示意)

Fig. 6 Curve of relation between reliability and substation capacity

路几种接线模式的可靠性从低到高依次为单电源线辐射接线模式、不同母线出线的环式接线模式或不同母线三回馈线的环式接线模式、三分段三联络接线模式; 电缆线路几种接线模式的可靠性从低到高依次为单电源线辐射接线模式、不同母线出线的环式接线模式、不同母线出线连接开闭所的接线模式、不同母线环网接线(三座开闭所)模式。

## 4 结论

基于对中压配电网经济性和可靠性的定量分析结果, 经综合考虑, 从中可得出一般性结论:

a. 在可靠性要求很高的区域例如城市繁华中心区, 在经济条件允许的情况下, 10 kV 的网络接线模式一般采用电缆接线, 此时建议采用电缆接线的不同母线环网接线(三座开闭所)模式或不同母线出线连接开闭所接线模式。

b. 在可靠性要求较高的区域例如一般城区等, 应兼顾经济性的要求, 此时 10 kV 的网络接线模式建议采用电缆接线的不同母线出线的环式接线模式或架空接线的三分段三联络接线模式, 也可采用架空接线的不同母线出线的环式接线模式和不同母线三回馈线的环式接线模式。

c. 在可靠性要求不很高的地区例如城郊等, 应以经济性要求为主, 10 kV 的网络接线模式建议采用架空接线的不同母线出线的环式接线模式或不同母线三回馈线的环式接线模式。

