

城市配电网接线模式经济性和可靠性分析

谢莹华¹, 王成山¹, 葛少云¹, 王赛一¹, 林瑞兴²

(1. 天津大学 电气与自动化工程学院, 天津 300072;

2. 福建省电力勘测设计院, 福建 福州 350000)

摘要: 从经济性和可靠性两方面, 对包含 110 kV 高压配电网和 10 kV 中压配电网的城市组合电网接线模式进行了分析比较。采用了一种供电面积可调的分析模型。根据负荷密度和变电所容量大小改变供电区域半径, 采用“单位负荷年费用”为经济性指标, 以“平均用电有效度”为可靠性指标, 对两级配电网形成的组合电网进行了经济性和可靠性指标的量化计算, 研究 2 种指标随负荷密度和变电所容量变化的趋势, 以及进行相同条件下不同接线模式之间的比较。在对计算结果综合分析的基础上, 根据不同情况推荐了具有参考意义的接线模式。

关键词: 配电系统; 接线模式; 经济性; 可靠性

中图分类号: TM 726

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)07-0012-05

0 引言

城市配电系统一般包括 3 级子网络: 220 kV, 110 kV, 66 kV 或 35 kV 高压配电网; 20 kV, 10 kV 中压配电网; 380 V/220 V 低压配电网。随着配电网改造工作的进一步扩大和深化, 合理规划、有效建设以取得最大效益, 已成为各级决策者十分关注的问题。配电网规划工作中需要决策的内容很多, 例如: 变压器容量、台数以及配电网接线模式等。这些问题常常令规划人员感到困惑, 也带来很多争议。为了使规划决策更加科学合理, 减少规划人员的工作量, 有必要通过一定的优化计算和技术经济论证, 对各种基本接线模式进行分析比较。

在对接线模式的分析过程中, 通常采用的供电模型是假定配电网覆盖区域的面积和形状一定, 在此基础上再进行量化计算^[1,2]。显然, 这种量化计算结果将受到特定供电区域面积和形状的影响, 在一定程度上降低了方案间的可比性。

为此, 本文采用了一种供电面积可调的分析模型, 根据负荷密度和变电所容量大小改变供电区域半径, 使论证的计算方案更具可比性。对 110 kV 高压配电网和 10 kV 中压配电网形成的组合电网进行了深入研究, 考虑了 4 种供电区域负荷密度水平, 10 种变压器容量台数组合方案, 4 种 110 kV 配电网接线模式, 3 种 10 kV 架空线路接线模式, 4 种 10 kV 电缆线路接线模式, 共对 1120 种组合方案的经济性和可靠性指标进行计算, 并对计算结果进行了分析比较, 给出具有参考意义的推荐模式。

1 模型假设

对于一个确定的规划区域, 结合区域内的负荷

密度以及街道分布等情况, 通过给出不同接线模式下具体的网络方案, 可以很容易分析出不同方案下网络的经济性和可靠性。然而, 如此得到的结论必然受所选区域具体条件的约束, 未必具有普遍意义。适当地对规划区域加以理想化, 在此基础上更可以得到一般的结论。本文结合城市配电网的实际特性, 采用了一种供电面积可调的分析模型, 如图 1 所示(图中 □ 为 110 kV 变电所, ○ 为 10 kV 变电所)。

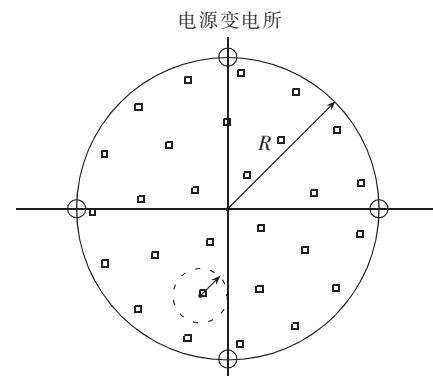


图 1 方案分析模型

Fig.1 Scheme analysis model

对该模型进行以下假设:

- a. 电网覆盖区域内部负荷均匀分布;
- b. 各 110 kV 变电所(文中设定为 28 所)的供电区域为圆形, 变电所在配电网覆盖区域内均匀分布, 配电网覆盖区域近似为圆形;
- c. 组合电网的电源变电所(文中设定为 4 所)在供电区域边界上均匀分布, 能满足不同负荷密度条件下区域的供电需求;
- d. 同一方案中, 各个 110 kV 变电所的变压器容量、台数和负载率均相同。

模型中的主要参数计算如下:

$$r = \sqrt{Se(S)\lambda} / (\pi D) \quad (1)$$

$$P = nSe(S)\lambda \quad (2)$$

式中 r 为 110 kV 变电所供电半径; P 为配电网覆盖区域总负荷; S 为 1 个 110 kV 变电所中变压器的总额定容量; $e(S)$ 为所内变压器负载率, 它与变压器台数有关; D 为电网覆盖区域的平均负荷密度; $\lambda = \cos \varphi$ 为功率因数; n 为 110 kV 变电站个数。

配电网覆盖区域的边界可以近似视为圆形, 设 R 为电网覆盖区域半径, 则有

$$R = \sqrt{nSe(S)\lambda / (\pi D)} = \sqrt{nr} \quad (3)$$

2 接线模式

配电网接线模式众多, 对 110 kV 配电网, 本文研究了 4 种典型接线模式^[3]: 同电源不同母线辐射接线、不同电源双 T 接线、同电源不同母线双 T 接线、双侧电源不同母线双 T 接线。具体接线方式因变压器台数不同而略有差异, 图 2 为变电站含 2 台和 3 台变压器时的电网接线图(图中——表示断路器, ——表示隔离开关; 标号(2)表示含 2 台变压器, (3)表示含 3 台变压器; 下同)。

实际情况中, 城市中压配电网可能由架空线和电缆线混合组成^[4], 混合情况较为复杂。本文在分析 10 kV 中压配电网接线模式时, 将架空线路和电缆线路分开研究, 这样也不失一般性^[5]。对架空线路, 考虑了以下几种接线模式: 单电源辐射接线、不同母线出线的环式接线、不同母线三回馈线的环式接线和三分段三联络接线, 如图 3(a)~(d) 所示。由于不同母线出线的环式接线和不同母线三回馈线的环式接线在线路裕量和负荷转移能力上相同, 故归到一起分析。对电缆线路, 考虑了 4 种典型接线模式: 单电源辐射接线、不同母线出线的环式接线、不同母线出线连接开闭所接线和不同母线环网接线(3 座开闭所), 如图 3(e)~(h) 所示。

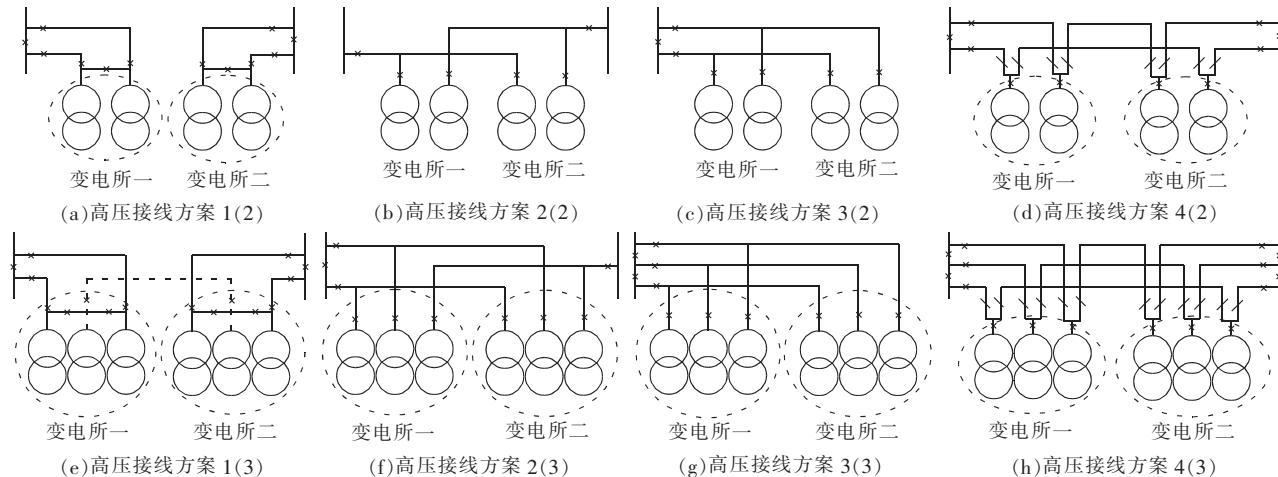


Fig.2 Connection modes of 110 kV distribution network

表 1 为接线模式编号表。组合配电网接线模式用两位数表示, 第一位为 110 kV 电网接线模式编号, 第二位为 10 kV 电网接线模式编号。例如中压线路为架空线的组合方案 21, 表示 110 kV 电网采用不同电源双 T 接线, 10 kV 电网采用单电源辐射接线。

表 1 接线模式编号表
Tab.1 Numbers of connection mode

类型	编号	接线模式
110 kV	1	同电源不同母线辐射接线
	2	不同电源双 T 接线
	3	同电源不同母线双 T 接线
	4	双侧电源不同母线双 T 接线
10 kV 架空出线电网	1	单电源辐射接线
	2	不同母线环式接线或不同母线三回馈线的环式接线
	3	三分段三联络接线
10 kV 电缆出线电网	1	单电源辐射接线
	2	不同母线环式接线
	3	不同母线出线连接开闭所接线
	4	不同母线环网接线(3 座开闭所)

3 经济性分析

在进行经济性评估时, 一般采用“现值转年值法”^[6]进行动态经济比较。由方案分析模型假设易知, 不同方案的系统总负荷量也可能不同。为使不同负荷量的方案具有可比性, 本文采用了“单位负荷年费用”作为经济性指标, 进行方案的经济性比较。

不考虑电源变电所费用, 组合配电网年费用由 110 kV 线路年费用、110 kV 变电所年费用和 10 kV 线路年费用三部分组成, 计算公式如下:

$$F = F_{hl} + n \times (F_s + F_{ml}) \quad (4)$$

式中 F 为组合配电网年费用; F_{hl} 为网内 110 kV 线路年费用; F_s 为一所 110 kV 变电站年费用; F_{ml} 为一所 110 kV 变电站 10 kV 出线的年费用; n 为 110 kV 变电所总数。

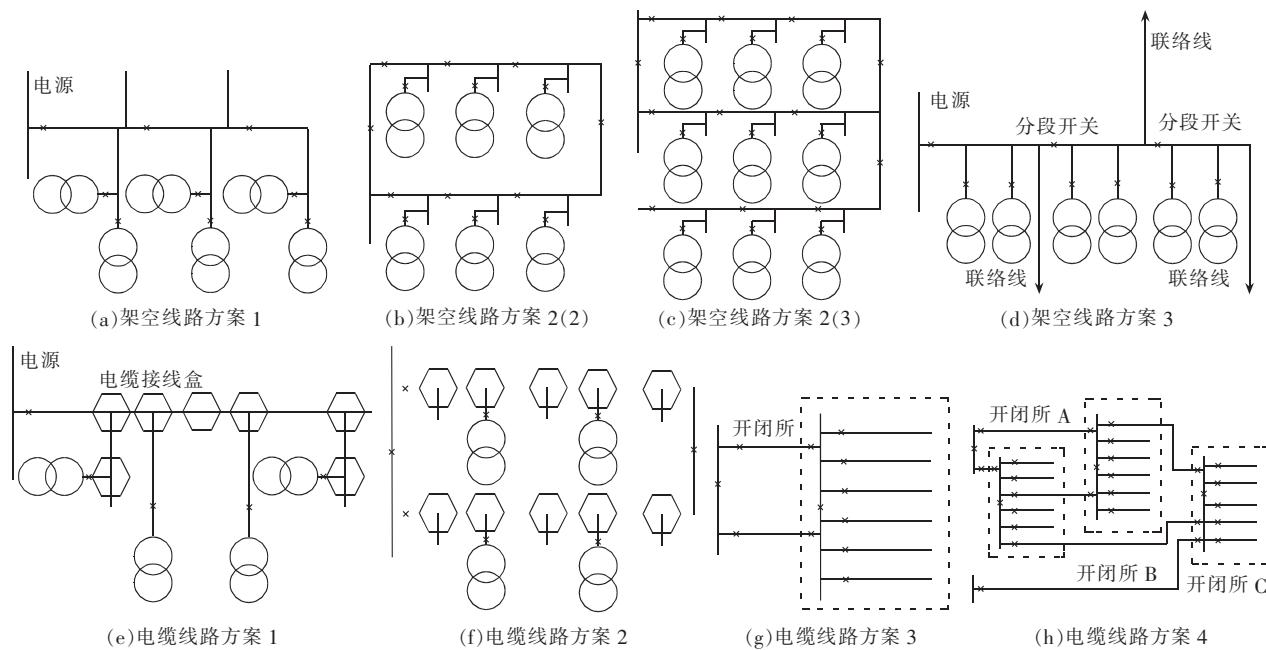


图 3 10 kV 配电网架空线路和电缆线路接线模式

Fig.3 Overhead line and cable connection modes of 10 kV distribution network

F_{hl}, F_s, F_{ml} 的计算公式可以统一表示为

$$F_i = Z \left[\frac{r_0 (1+r_0)^{n_s}}{(1+r_0)^{n_s} - 1} \right] + C_U \quad (5)$$

式中 F_i 为 F_{hl}, F_s, F_{ml} 之一; Z 为电力设备(线路或变电站)综合投资费用现值; C_U 为设备年运行费用; n_s 为设备经济使用年限(变电站取 25 年, 架空线路取 30 年, 电缆线路取 40 年); r_0 为电力工业投资回收率, 取 $r_0=0.1$ 。

详细计算方法可参阅文献[4]。

组合电网单位负荷年费用值 F_p , 可由式(6)求得:

$$F_p = F/P \quad (6)$$

式中 P 为电网覆盖区域总负荷, 计算公式见式(2)。

4 可靠性分析

配电系统多为环形网络开环运行, 可以将其作为辐射形系统处理。评估的基本指标有负荷点平均停运率 λ (次/年)、平均停运时间 t_y (小时/次)和年平均停运时间 t (小时/年)。用于评估系统可靠性的指标很多^[7], 可根据实际需要选定。为了反映系统停运的严重程度和重要性, 一般用平均用电有效度(I_{ASAI})作为评估指标, 计算公式如下:

$$I_{ASAI} = \frac{8760 \times \sum N_i - \sum t_i N_i}{8760 \times \sum N_i} = 1 - \frac{\sum t_i N_i}{8760 \times \sum N_i} \quad (7)$$

式中 N_i 为负荷点 i 的用户数; t_i 为负荷点 i 的年平均停运时间。

考虑 110 kV 和 10 kV 两级电网的串联关系^[8,9], 不计电源变电所故障, 则组合电网的 I_{ASAI} 指标计算如下:

$$I_{ASAI} = I_{ASAI(h)} I_{ASAI(l)} \quad (8)$$

式中 $I_{ASAI(h)}$ 为 110 kV 网架的平均用电有效度; $I_{ASAI(l)}$ 为 10 kV 网架的平均用电有效度。

组合电网的 I_{ASAI} 指标为两级电网平均用电有效度的乘积。

5 计算结果及分析

5.1 计算数据

本文考虑了 4 种负荷密度水平: 2.0, 5.0, 20.0, 40.0(MW/km²); 10 种变电器台数和容量组合: 2×25 MV·A, 2×31.5 MV·A, 2×40 MV·A, 2×50 MV·A, 2×63 MV·A, 3×25 MV·A, 3×31.5 MV·A, 3×40 MV·A, 3×50 MV·A 和 3×63 MV·A。变电所含 2 台变压器时, 每台变压器的负载率为 0.65; 3 台变压器时, 负载率为 0.87。变电站及线路费用见文献[5]。

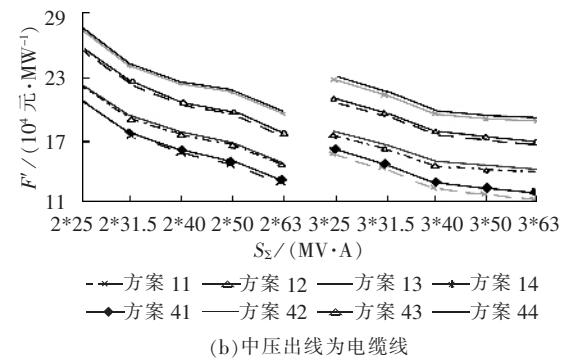
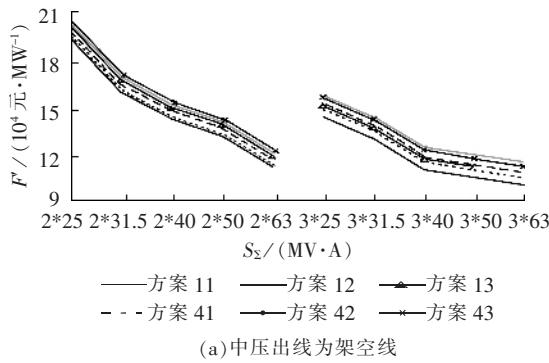
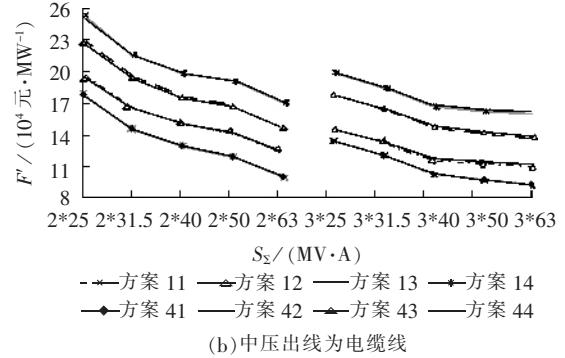
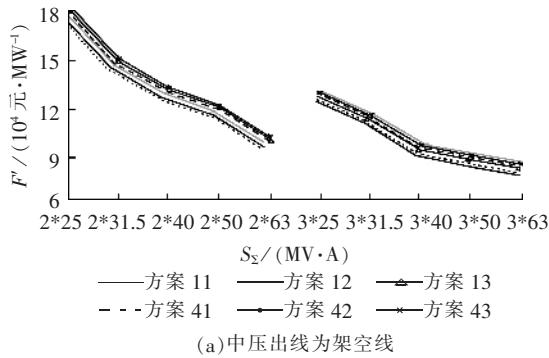
5.2 经济性计算结果及分析

由于本文篇幅所限, 仅列出部分计算结果。图 4 和图 5 分别为负荷密度取 5 MW/km² 和 20 MW/km² 时, 不同接线模式下, 组合电网单位负荷年费用随变电所容量变化的曲线。图中横坐标 S_2 表示变电站容量组合(MV·A), 纵坐标 F' 表示组合电网单位负荷年费用(10⁴ 元/MW)。由于 110 kV 接线采用模式 1, 2, 3 时, 高压线路的单位负荷年费用相近, 所以图中只画出了 110 kV 接线模式 1, 4 与中压接线模式组合方案的费用曲线。

由经济性指标计算结果, 可得 3 点结论。

a. 在一定变电所容量条件下, 对于同一种接线模式, 组合电网的单位负荷年费用值随供电区域负荷密度的增加而下降; 在一定负荷密度下, 对于同一种接线模式, 组合电网的单位负荷年费用值随变电所容量的增加而降低。

b. 若 10 kV 出线采用架空线, 当变电所含 2 台

图4 单位负荷年费用-变电所容量曲线(负荷密度 5.0 MW/km²)Fig.4 Curve of annual cost for unit load versus substation capacity(load density being 5.0 MW/km²)图5 单位负荷年费用-变电所容量曲线(负荷密度 20.0 MW/km²)Fig.5 Curve of annual cost for unit load versus substation capacity(load density being 20.0 MW/km²)

变压器时,以变电所容量为 $2 \times 50 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 负荷密度为 $20 \text{ MW}/\text{km}^2$ 的方案为例,12 种接线模式的单位负荷年费用由高到低依次为 $13, 43, 12, 42, 23, 22, 11, 33, 41, 32, 21, 31$ 。当变电所含 3 台变压器时,以变电所容量为 $3 \times 50 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 负荷密度为 $20 \text{ MW}/\text{km}^2$ 方案为例,12 种接线模式的单位负荷年费用由高到低依次为 $42, 43, 12, 13, 41, 22, 32, 23, 33, 11, 21, 31$ 。

c. 若 10 kV 出线采用电缆线,当变电所含 2 台变压器时,以变电所容量为 $2 \times 50 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 负荷密度为 $20 \text{ MW}/\text{km}^2$ 方案为例,16 种接线模式的单位负荷年费用由高到低依次为 $14, 44, 24, 34, 13, 43, 23, 33, 12, 42, 22, 32, 11, 41, 21, 31$ 。当变电所含 2 台变压器时,以变电所容量为 $3 \times 50 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 负荷密度为 $20 \text{ MW}/\text{km}^2$ 方案为例,16 种接线模式的单位负荷年费用由高到低依次为 $44, 14, 24, 34, 43, 13, 23, 33,$

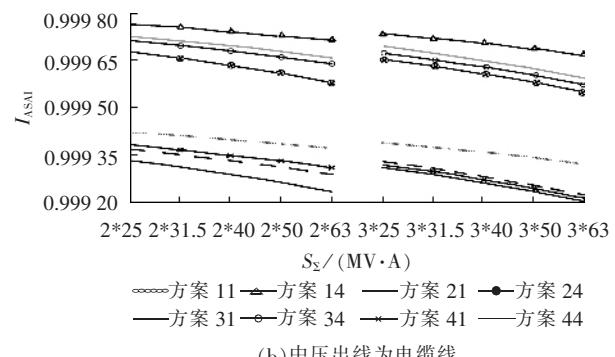
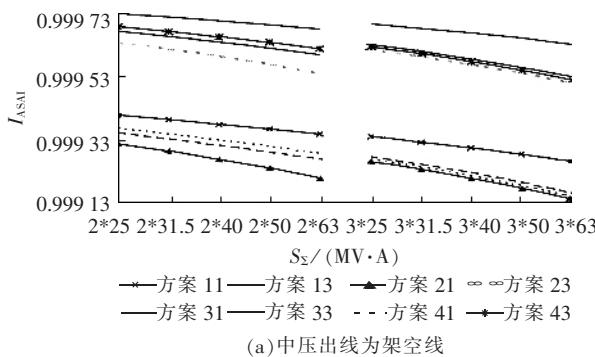
$42, 12, 22, 32, 41, 11, 21, 31$ 。

5.3 可靠性计算结果及分析

图 6 和图 7 分别为负荷密度取 $5 \text{ MW}/\text{km}^2$ 和 $20 \text{ MW}/\text{km}^2$ 时,不同接线模式下,组合电网的可靠性随变电所容量变化的曲线。图中横坐标 S_2 表示变电站容量组合 ($\text{MV}\cdot\text{A}$),纵坐标表示组合电网 I_{ASAI} 指标。由于 10 kV 架空线路接线模式 2 与 3 的可靠性相近,电缆线路接线模式 1 与 2,3,4 的可靠性相近,所以图中只画出了部分组合方案的可靠性曲线。由可靠性指标计算结果,亦可得下面 3 点结论。

a. 在一定变电所容量条件下,对于同一种接线模式,组合电网可靠性随供电区域负荷密度的增加而提高;在一定负荷密度下,对于同一种接线模式,组合电网可靠性随变电所容量的增加而降低。

b. 若 10 kV 出线采用架空线,当变电所含 2 台

图6 I_{ASAI} 指标-变电所容量曲线(负荷密度 5.0 MW/km²)Fig.6 Curve of I_{ASAI} versus substation capacity(load density being 5.0 MW/km²)

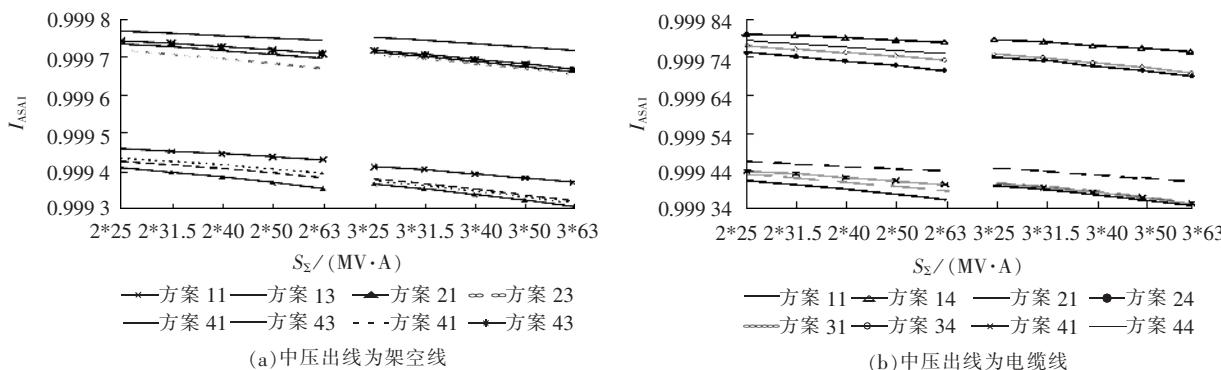


图 7 I_{ASAI} 指标-变电所容量曲线(负荷密度 $20.0 \text{ MW}/\text{km}^2$)

Fig.7 Curve of I_{ASAI} versus substation capacity(load density being $20.0 \text{ MW}/\text{km}^2$)

变压器时,以变电所容量为 $2 \times 50 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 负荷密度为 $20 \text{ MW}/\text{km}^2$ 的方案为例,12 种接线模式的可靠性由高到低依次为 13, 12, 43, 42, 33, 32, 23, 22, 11, 41, 31, 21。当变电所含 3 台变压器时,以变电所容量为 $3 \times 50 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 负荷密度为 $20 \text{ MW}/\text{km}^2$ 方案为例,12 种接线模式的可靠性由高到低依次为 13, 12, 33, 43, 23, 32, 42, 22, 11, 31, 41, 21。

c. 若 10 kV 出线采用电缆线,当变电所含 2 台变压器时,以变电所容量为 $2 \times 50 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 负荷密度为 $20 \text{ MW}/\text{km}^2$ 方案为例,16 种接线模式的可靠性由高到低依次为 14, 13, 44, 12, 43, 34, 33, 24, 42, 23, 32, 22, 11, 41, 31, 21。当变电所含 3 台变压器时,以变电所容量为 $3 \times 50 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 负荷密度为 $20 \text{ MW}/\text{km}^2$ 方案为例,16 种接线模式的可靠性由高到低依次为 14, 13, 12, 34, 44, 24, 33, 43, 23, 32, 42, 22, 11, 31, 41, 21。

6 结论

本文采用了一种供电面积可调的分析模型,对多种负荷密度、变压器台数和容量组合下,不同高压、中压配电网接线模式形成的组合电网方案,进行了经济性和可靠性指标计算,并对结果进行了分析比较,经综合考虑,可得出一般性结论。

a. 对于可靠性要求很高的区域,在经济条件允许的情况下,110 kV 网络接线模式建议采用可靠性高的同电源不同母线辐射接线或双侧电源不同母线双“T”接线;10 kV 网络接线模式采用电缆接线的不同母线环网接线(3 座开闭所)或不同母线出线连接开闭所接线。

b. 对可靠性要求较高区域,要兼顾经济性要求,110 kV 网络接线模式建议采用同电源不同母线双“T”接线;10 kV 采用电缆接线的不同母线出线的环式接线或架空接线的不同母线环式接线。

c. 在可靠性要求不是很高的地区,以经济性要求为主,110 kV 网络接线模式建议采用同电源不同母线双“T”接线方式或不同电源双“T”接线;10 kV 网络接线模式采用架空接线的不同母线环式接线。

参考文献:

- [1] 陈章潮,唐德光. 城市电网规划与改造[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [2] 陈庭记,程浩忠,何明,等. 城市中压配电网接线模式研究[J]. 电网技术,2000,24(9):35-38.
CHEN Ting-ji, CHENG Hao-zhong, HE Ming, et al. Research on connection modes of urban middle voltage distribution networks[J]. **Power System Technology**, 2000, 24(9):35-38.
- [3] 葛少云,郭明星,王成山,等. 城市高压配电网接线模式比较研究[J]. 电力自动化设备,2004,24(2):33-37.
GE Shao-yun, GUO Ming-xing, WANG Cheng-shan, et al. Comparative study of connection modes in high-voltage distribution networks[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2004, 24(2):33-37.
- [4] DL/T 599-1996,城市中低压配电网改造技术导则[S].
- [5] 王成山,王赛一,葛少云,等. 中压配电网不同接线模式经济性和可靠性分析[J]. 电力系统自动化,2002,26(24):34-39.
WANG Cheng-shan, WANG Sai-yi, GE Shao-yun, et al. Economy and reliability analysis of different connection modes in MV distribution networks[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2002, 26(24):34-39.
- [6] 陈立新. 电力工程技术经济知识[M]. 北京:中国电力出版社,1999.
- [7] BILLINTON R, ALLAN R N. 电力系统可靠性评估[M]. 周家启,任震译. 重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1986.
- [8] BILLINTON R, JOHNNAVITHULA S. A test system for teaching overall power system reliability assessment [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1996, 11(4):1670-1676.
- [9] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1991, 6(2):813-830.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

谢莹华(1978-),女,湖南长沙人,博士研究生,主要研究方向为电力系统规划(E-mail:juliettexie@hotmail.com);
王成山(1962-),男,天津人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统安全性分析、电力系统规划和配电网系统自动化等(E-mail:cswang@tju.edu.cn)。

Economy and reliability analysis of connection modes in urban distribution networks

XIE Ying-hua¹, WANG Cheng-shan¹, GE Shao-yun¹, WANG Sai-yi¹, LIN Rui-xing²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Fujian Electric Power Survey & Design Institute, Fuzhou 350000, China)

Abstract: As viewed from economy and reliability, the connection modes of urban combination systems, which are composed of 110 kV high voltage networks and 10 kV middle voltage networks, are analyzed and compared. A power supply area-adjustable model is adopted, which adapts its supply radius to the associated load density and substation capacity. The economy index of annual cost for unit load and the reliability index of ASAII are adopted and quantified for the combination power system to study their trends by the change of load density and substation capacity. Different connection modes in the same condition are compared. Based on the synthetic analysis of calculative results, several connection modes are commended to different application circumstances.

Key words: distribution networks; connection modes; economy; reliability