

# 中心城区 10 kV 主干网络分析模型研究

葛少云<sup>1</sup>, 韩俊<sup>1</sup>, 刘洪<sup>1</sup>, 刘阳<sup>1</sup>, 王赛一<sup>2</sup>, 朱永卫<sup>2</sup>, 程正敏<sup>2</sup>, 梁忆辰<sup>2</sup>

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072;  
2. 上海市电力公司 市区供电公司, 上海 200080)

**摘要:** 构建了中压配电网分析模型来梳理和规范 10 kV 主干网架结构。首先, 结合中压配电网分层分区的基本思想, 定义了 10 kV 主干网络和次级网络的概念, 明确了中压配电网的层次结构及功能定位; 其次, 结合中心城区配电网高供电能力、高可靠性的需求, 构建了基于开关站供电模式的典型供电块联络模型、变电站及开关站空间布局的约束性分析模型。以上工作为主干网络供电能力水平的提高及供电范围的合理规划奠定了理论基础; 最后, 根据某城市中心城区配电网运行的实情, 制定参数的边界条件, 进行模型的分析 and 计算, 验证了所提模型的合理性和有效性。

**关键词:** 配电网; 分层分区; 主干网络; 变电站; 模型; 网络分析

**中图分类号:** TM 72

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.08.003

## 0 引言

长期以来, 10 kV 配电网网架一直存在着复杂、参差不齐的状态, 主要是由于地区负荷发展不平衡以及中低压配电网网架没有统一、整体的规划所造成的。对于管理调度<sup>[1-2]</sup>的方便性和配电网运行的安全可靠<sup>[3-5]</sup>而言, 这种运行状态都是有隐患的。

目前关于 10 kV 中压配电网网架结构<sup>[6-8]</sup>的研究工作, 主要体现在接线模式<sup>[9-14]</sup>的适应性、经济性和可靠性等方面。这些都是针对 10 kV 线路本身所展开的研究, 并没有充分考虑 110 kV/35 kV 变电站与 10 kV 线路间的关系, 另外, 10 kV 接线模式涉及到的大多数是主干线路, 而对于从开关站分出来的次级 10 kV 线路的研究并不多, 没有相关成形的结论, 这也是 10 kV 配电网复杂混乱的原因所在。因此, 有必要对 10 kV 中压配电网主、次级网络的结构及功能特性开展相关研究工作。

鉴于当前城市的中心城区配电网对供电能力、供电可靠性及城市美观建设的需求, 10 kV 中压电网常常采用电缆线路进开关站的供电模式, 而现有的中低压配电网技术导则没有对 110 kV/35 kV 变电站与开关站的数量配置关系、落点、站间联络的开关站比例、开关站次级 10 kV 出线配置及装接配变容量大小等问题做出相关明确的规定。因此, 有必要针对中心城区配电网的特点及需求构建 10 kV 主、次级网络分析模型, 为城区中压配电网的建设和精益化管理提供理论指导。限于篇幅, 本文重点对基于开关站供电模式的 10 kV 主干网络开展相关模型的构建

及算例分析, 相关结论可以对中心城区中低压配电网技术导则的修订提供指导意见。

## 1 中压配电网主、次级网络概念的界定

### 1.1 中压配电网分层分区概念

文献[15-16]首次提出了中压配电网分层分区的基本原则, 依据网架的联络关系和供电能力, 将该配电网电压层级再分若干层次; 依据电网建设的具体区域性质, 将该配电网电压层级划分为若干区域, 使配电网结构明晰, 管理调度易于进行。

### 1.2 10 kV 主干网络概念的界定

所谓主干网络, 即从 110 kV 或 35 kV 变电站低压侧所出的 10 kV 主干线路, 主要包括 10 kV 专用线路、K 型站及 P 型站的电源进线、架空主干线路等。本文研究构建以 K 型站供电模式为主的主干网络, 其结构示意图如图 1 所示。

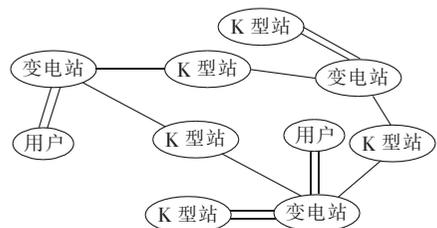


图 1 主干网络示意图

Fig.1 Schematic diagram of backbone network

### 1.3 10 kV 次级网络概念的界定

所谓次级网络, 主要指 K 型站、P 型站出线所构成的 10 kV 网络。次级网络在主变负荷的分配及如何释放等方面起着重要的作用, 其结构示意图如图 2 所示。

特别要指出的是, 本文研究的 K 型站指普通开关站, 10 kV 线路一般采用二进十出模式; P 型站土

收稿日期: 2012-09-26; 修回日期: 2013-07-17  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51107085)  
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51107085)

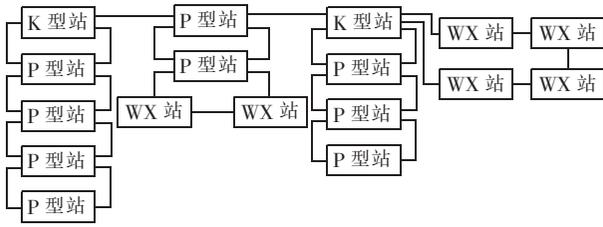


图 2 次级网络示意图

Fig.2 Schematic diagram of secondary network

建规模及站内配变容量比 K 型站稍小,10 kV 线路一般采用二进六(八)出模式;WX 型站指的是一般意义上的箱变。

## 2 主干网络分析模型的构建与求解

本文所提出的主干网络分析模型主要围绕变电站与 K 型站间的联络及空间布局来构建各部分的分析模型,主要包括以下 2 个方面:变电站与 K 型站规模配置的分析模型;变电站与 K 型站空间布局的约束性模型。这两部分计算模型对配电网供电能力的提升、变电站及 K 型站供电范围的合理划分都有着重要的指导意义。

### 2.1 变电站与 K 型站规模配置的分析模型

通过变电站与 K 型站规模配置分析模型的构建与求解,可以计算出供电块内变电站在满足供电能力、站间联络通道数等约束条件下主变站间的 10 kV 负荷转移能力的大小。在此基础上,结合 K 型站供电模式的特点,可以计算出变电站装接 K 型站的数量及不同电源进线的 K 型站数量配置情况,相关结论对于 10 kV 网络负荷转移能力的提升及网络结构的规范和统一有着重要的指导意义。

#### 2.1.1 供电能力理论分析方法

文献[17-18]提出了基于主变互联和  $N-1$  准则的配电系统供电能力计算方法,该方法从主变联络单元入手展开供电能力分析,抓住了配电系统网络互联产生转移能力的基本特点,为面向供电能力提高的主变站间联络结构优化奠定了重要的理论基础。

#### 2.1.2 主变联络结构优化设置的一般模型

针对含有多座变电站的供电块,如何建立供电块内变电站及主变间合理的联络关系,确保整个供电块达到高效、可靠、经济的供电效果是建立中心城区精品化目标网架所关心的问题。主变联络结构的优化设置问题本质上就是基于给定目标条件下的主变联络关系矩阵  $L$  的寻优过程。

结合当前城市配电网在发展过程中遇到的问题,本文以供电能力、主变联络通道数及区域联络通道总长度为目标函数构建基于多目标的主变联络结构优化模型,如式(1)~(6)所示。

$$\max \text{psc}(\mathbf{L}), \quad \min \sum_{i=1}^{N_{\Sigma}} \sum_{j=1}^{N_{\Sigma}} l_{ij}, \quad \min \sum_{i=1}^{N_{\Sigma}} \sum_{j=1}^{N_{\Sigma}} l_{ij} d_{ij} \quad (1)$$

$$\mathbf{L} = [l_{ij}]_{N_{\Sigma} \times N_{\Sigma}}, \quad \mathbf{L}^T = \mathbf{L} \quad (2)$$

$$l_{ij} = \begin{cases} C & d_{ij} = 0 \\ l_{ij}(l_{ij} - 1) = 0 & d_{ij} \leq d_{\text{lim}} \\ 0 & d_{ij} > d_{\text{lim}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} \left| \sum_{k=1}^{N_{\Sigma}} l_{ik} - \sum_{k=1}^{N_{\Sigma}} l_{jk} \right| \leq \delta_1 & \forall i, j \in \Omega_{1a} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \left| \sum_{k=N_{(a-1)\Sigma+1}}^{N_{a\Sigma}} l_{ik} - \sum_{k=N_{(a-1)\Sigma+1}}^{N_{a\Sigma}} l_{jk} \right| \leq \delta_2 & \forall i, j \in \Omega_{1a} \end{cases} \quad (5)$$

$$\sum_{j=1, j \neq g}^{N_{\Sigma}} l_{ij} \leq D_s \quad \forall i, g \in \Omega_{1a} \quad (6)$$

其中,  $\text{psc}(\cdot)$  为供电能力综合分析函数;  $L$  为表示主变联络关系的对称矩阵,  $l_{ij}$  表示  $i$  号和  $j$  号主变间的联络关系,  $N_{\Sigma}$  为区域主变总数;  $d_{ij}$  为主变间联络通道长度(可由变电站地理坐标计算得出);  $d_{\text{lim}}$  为变电站主变间允许建立联络通道的长度上限(距离太远的变电站间不建议设立联络);  $\delta_1$  为供电块内同站主变站间全局联络通道数的均衡性约束;  $\delta_2$  为任意两变电站同站主变站间联络通道数的均衡性约束;  $D_s$  为主变站间联络总数上限,一般联络度数控制在 5 及以下;  $a, b$  为供电块内任意 2 座变电站的编号;  $\Omega_{1a}$  为供电块内第  $a$  座变电站的站内主变集合。

式(1)表示满足供电能力最大、联络通道数最少、联络通道总长度最小 3 个目标函数;式(2)和(3)表示初始联络关系矩阵中变量的生成;式(4)和(5)为主变全局和局部的站间联络均衡性约束;式(6)为主变站间联络通道总数约束。

#### 2.1.3 基于主变互联的典型供电块联络模型的构建

针对主变联络结构优化分析一般性模型所关注的一系列重要指标,本文结合文献[19]的相关工作,主要从互联变电站座数、站内主变配置、主变站间联络关系、联络容量大小这 4 个维度信息来构建典型供电块联络模型。

为简化供电块联络关系的计算分析过程,本文针对联络结构优化模型的边界条件如下:

**a.** 由于互联变电站座数一般不宜超过 4 座,因此本文选取了含 2~4 座变电站(站内主变配置一般为 2~3 台)互联的供电块,同时将互联变电站座数与站内主变配置 2 个维度合并,形成  $2 \times 2$ 、 $2 \times 3$ 、 $3 \times 2$ 、 $3 \times 3$ 、 $4 \times 2$ 、 $4 \times 3$  这 6 种“变电站-主变”的组合模式;

**b.** 假设供电块内变电站主变容量均相同,大小为  $S$ , 单位为  $\text{MV} \cdot \text{A}$ ;

**c.** 不考虑供电块内变电站间距离的差异性,即认为供电块内变电站间的相互距离  $d_{ij}$  均一致,且均未超过  $d_{\text{lim}}$ ;

**d.** 取  $\delta_1 = \delta_2 = 0$ , 即供电块内任意变电站主变的站

间联络结构完全均衡。

以式(1)–(6)所提出的主变联络结构优化模型为基础,以基于 2~4 座变电站互联的供电块的相关信息为初始数据,采用遗传算法进行模型的求解,得出各种“变电站-主变”的组合模式下主变站间的最大负载率水平、最小联络通道数及满足主变 N-1 校验时所需的站间联络容量大小,详细结果见表 1。

表 1 基于 2~4 座变电站互联的典型供电块联络模型的构建

Tab.1 Construction of contact model for typical power block with 2~4 interconnected substations

“变电站-主变”组合模式	变电站整体结构	站间联络通道数	主变平均负载率水平/%	主变电站间联络容量
2×2		2	75	0.25 S
2×3		3	83.33	0.17 S
3×2		6	82.5	0.18 S
3×3		9	88.89	0.11 S
4×2		12	86	0.14 S
4×3		18	91.67	0.08 S

以两主变为例,表 1 对应的最优联络关系矩阵如式(7)–(9)所示,对应的主变联络结构示意图如图 3 所示。

2×2 模式:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

3×2 模式:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

4×2 模式:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.1.4 变电站与 K 型站数量配置的实际案例分析

通过典型供电块联络模型的构建,得出了各“变电站-主变”组合模式下的主变平均负载率水平、站间联络通道数及联络容量大小等指标,结合中心城区以 K 型站供电模式为主的特点,可以得到各种典

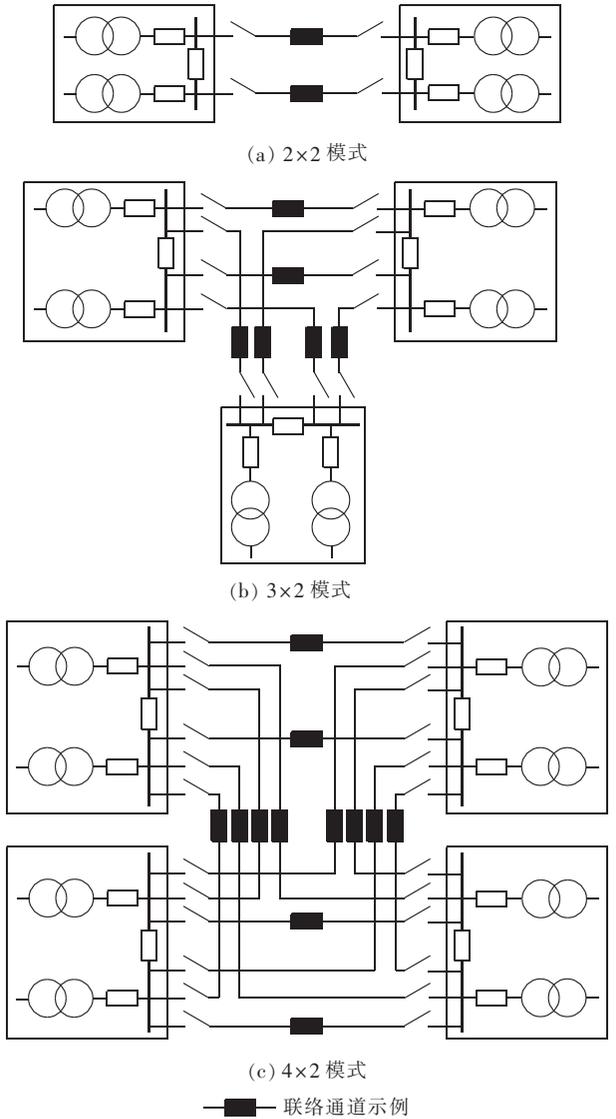


图 3 主变联络结构

Fig.3 Interconnection of primary transformers

型供电块联络结构下,整个供电区域共需建设的 K 型站数目、不同电源进线的 K 型站的数目及比例,由此确定不同供电块下 10 kV 主干网络的基本结构。

根据某大型城市的中心城区配电网运行的实际情况,本文选取主变的允许短时过载系数为 1.3,主变容量分别取 40 MV·A 和 50 MV·A,中压电缆线路载流量为 400 A。

a. 变电站与 K 型站数量配置分析与计算。

基于各供电模型和不同约束条件下变电站与 K 型站数量配置分析结果见表 2,其中 X、Y、Z 分别为主变站间联络的 K 型站数量、整个区域 K 型站数量和整个供电区域不同电源进线 K 型站数量。表 2 中:各典型供电模型下的主变负载率能满足区域供电能力达到最大,因此可以看成是各典型模型在各自尖峰负荷下的负载率水平;变电站 10 kV 出线中,用户专线比例设为 20%,其他出线都为 K 型站电源进线。

表 2 不同供电模型的变电站与 K 型站数量配置结果

Tab.2 Results of substation and K-station configuration for different power supply models

主变容量/ (MV·A)	典型 供电模型	主变 总出线数	X	Y	Z
40	2×2	9	3	14	6
	2×3	10	2	24	6
	3×2	10	4	24	12
	3×3	10	4	36	18
	4×2	10	6	32	24
	4×3	11	3	54	18
50	2×2	11	4	18	8
	2×3	12	3	30	9
	3×2	12	6	30	18
	3×3	13	4	45	18
	4×2	12	6	40	24
	4×3	13	6	60	36

### b. 不同电源进线的 K 型站所占比例分析。

根据上述计算结果,分析不同供电块下,主变采用不同容量时,K 型站电源线来自不同变电站的情况及所占比例,结果如表 3 所示。

表 3 不同电源进线 K 型站所占比例  
Tab.3 Proportion of K-stations for different in-feed power lines

主变容量/(MV·A)	典型供电模型	比例/%
40	2×2	43
	2×3	25
	3×2	50
	3×3	50
	4×2	75
	4×3	33
50	2×2	44
	2×3	30
	3×2	60
	3×3	40
	4×2	60
	4×3	60

从表 3 可以看出,当主变容量为 40 MV·A 时,为满足 10 kV 网络负荷转移能力的需求,各典型供电块联络模型中电源进线来自不同变电站的 K 型站所占比例至少需达 25%;当主变容量为 50 MV·A 时,各典型供电块联络模型中电源进线来自不同变电站的 K 型站所占比例则至少需达 30%。

## 2.2 变电站及 K 型站空间布局的约束性分析模型

为了避免由长距离供电所造成的线路损耗过大、供电质量降低等问题,通过确定变电站和 K 型站的合理供电范围,来提高供电的可靠性和经济性。变电站供电半径与 K 型站空间布局约束性分析模型的基本框架如图 4 所示。

### 2.2.1 变电站及 K 型站的供电半径计算模型

本次研究以圆形供电模型为基础来进行分析,即可认为变电站或 K 型站的供电范围为圆形区域,

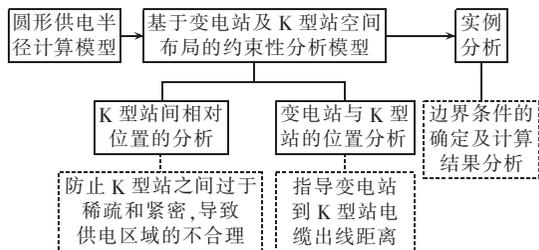


图 4 变电站及 K 型站空间布局的约束性分析模型

Fig.4 Binding analysis model of space distribution for substations and K-stations

变电站或 K 型站的位置落在圆心处。

设变电站每台主变或 K 型站电源进线的容量为  $S$ , 站内主变台数或电源进线数目为  $n$ , 主变或线路的负载率为  $T$ , 供电半径为  $r$ , 假定供电区域负荷密度均匀且都为  $M$ , 主变或线路的功率因数为  $\cos \varphi$ , 所构建的圆形供电模型如图 5 所示。

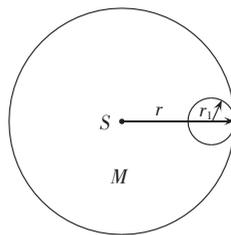


图 5 变电站及 K 型站的圆形供电模型图

Fig.5 Circular power supply model of substations and K-stations

变电站或 K 型站的供电半径与主变或电源进线的负荷供应能力的开方成正比,与负荷密度的开方成反比,计算方法如式(10)所示。

$$r = \sqrt{\frac{nST \cos \varphi}{\pi M}} \quad (10)$$

### 2.2.2 变电站与 K 型站位置的计算分析

设变电站主变台数为  $n$ , 主变容量为  $S$ , 主变的运行负载率为  $T$ , 功率因数为  $\cos \varphi$ , 变电站的供电半径为  $r$ ; 设 K 型站电源进线数目为  $n_1$ , 电源进线容量为  $S_1$ , 线路负载率为  $T_1$ , 线路功率因数为  $\cos \varphi_1$ , K 型站的供电半径为  $r_1$ , 供电区域内平均负荷密度为  $M$ 。

由于 K 型站的供电区域落在变电站的供电区域内,从几何的角度上当 K 型站的圆形供电区域与变电站的圆形供电区域相内切(图 5)时,K 型站与变电站的距离最远,此距离可称为变电站与 K 型站间的距离上限  $d_{\text{lim}}$ ,计算方法如下:

$$d_{\text{lim}} \leq r - r_1 = \sqrt{\frac{nST \cos \varphi}{\pi M}} - \sqrt{\frac{n_1 S_1 T_1 \cos \varphi_1}{\pi M}} \quad (11)$$

### 2.2.3 K 型站间相对位置的计算分析

如图 6 所示,当 3 座 K 型站的圆形供电区域相切时,必然会造成一部分供电死区,因此还需进一步缩小 K 型站间的距离,但该距离也不能太小,以免造成大范围供电重叠。因此,必须寻求合适的距离区

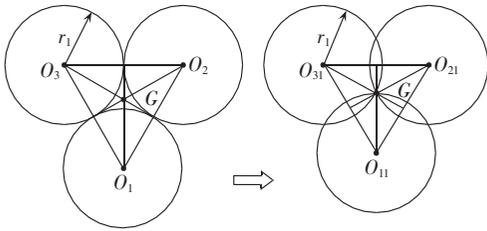


图 6 基于圆形供电模型的 K 型站相对位置分析  
Fig.6 Relative position analysis based on circular power supply model for K-stations

间来设置 K 型站间的相对位置,使得各 K 型站的供电重叠区域最小。

K 型站站间距离  $d_k$  约束范围的分析流程如图 7 所示,虚线框中过程的目的是消除供电死区,且使得供电重叠区域最小。

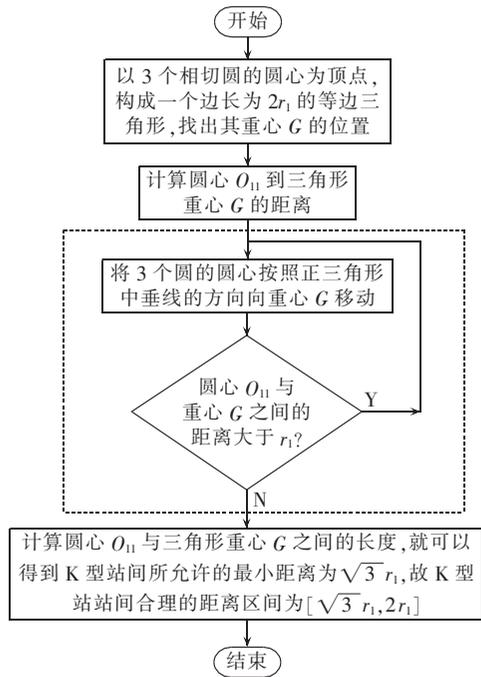


图 7 K 型站站间合适的距离区间分析流程

Fig.7 Analysis of suitable interval between K-stations

### 2.2.4 变电站及 K 型站空间布局的实际案例分析

结合某大型城市的中心城区配电网实际情况,主变容量取  $40 \text{ MV}\cdot\text{A}$  和  $50 \text{ MV}\cdot\text{A}$ ,主变的功率因数取 0.95,中压电缆线路载流量为 400 A,线路的功率因数取 0.95,供电区域内的平均负荷密度  $M$  取  $70 \text{ MW}/\text{km}^2$ 、 $50 \text{ MW}/\text{km}^2$ 、 $30 \text{ MW}/\text{km}^2$ 。

#### a. 变电站与 K 型站的距离上限 $d_{\text{lim}}$ 的分析。

基于不同供电块联络模型和约束条件下变电站与 K 型站的距离上限  $d_{\text{lim}}$  的分析结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出,当主变容量为  $40 \text{ MV}\cdot\text{A}$  时,变电站与 K 型站的距离应控制在 0.8 km 以内;当主变容量为  $50 \text{ MV}\cdot\text{A}$  时,变电站与 K 型站的距离应控制在 1 km 以内。

#### b. K 型站与 K 型站间距离范围 $d_k$ 的分析。

表 4 变电站与 K 型站距离上限分析结果

Tab.4 Upper limits of interval between substations or K-stations

主变容量/ (MV·A)	负荷密度/ (MW·km <sup>-2</sup> )	$d_{\text{lim}}$ 的计算结果/km					
		2×2	2×3	3×2	3×3	4×2	4×3
40	30	0.51	0.73	0.55	0.77	0.56	0.78
	50	0.39	0.57	0.42	0.59	0.44	0.61
	70	0.33	0.48	0.36	0.50	0.37	0.51
50	30	0.60	0.85	0.64	0.89	0.66	0.91
	50	0.46	0.66	0.50	0.69	0.51	0.70
	70	0.39	0.56	0.42	0.58	0.43	0.59

不同负荷密度下 K 型站间合适的距离区间的分析结果为:负荷密度  $30 \text{ MW}/\text{km}^2$ ,距离区间  $[0.47, 0.54] \text{ km}$ ;负荷密度  $50 \text{ MW}/\text{km}^2$ ,距离区间  $[0.36, 0.42] \text{ km}$ ;负荷密度  $70 \text{ MW}/\text{km}^2$ ,距离区间  $[0.31, 0.35] \text{ km}$ 。

从分析结果可以看出,在不同负荷密度水平 ( $30\sim 70 \text{ MW}/\text{km}^2$ )下,K 型站与 K 型站间的距离应控制在 300~550 m 之间比较合适。

### 3 结论

本文基于中心城区配电网 10 kV 主干网络分析模型的研究主要做了如下工作。

a. 结合中压配电网分层分区的基本原则,定义了 K 型站供电模式下的 10 kV 主干网络和次级网络的基本概念,进一步细化和明确了基于中心城区特色的 10 kV 中压配电网的层次结构及功能定位。

b. 以供电能力理论计算方法和供电块内主变联络结构优化模型为基础,建立了基于 K 型站供电模式下的典型供电块联络模型、变电站及 K 型站空间布局的约束性分析模型,为 10 kV 主干网络负荷转移能力水平的提高及供电范围的合理规划奠定了理论基础。

c. 根据某大型城市的中心城区配电网的实情,选取合适的参数对各模型进行计算和分析,得到了各种典型供电模型在不同主变容量和负荷密度情况下及站间联络 K 型站的设置比例、变电站与 K 型站及 K 型站间合适的距离区间,相关结论可以对中心城区中低压配电网的建设和精益化管理、中低压配电网技术导则的修订提供指导意见。

### 参考文献:

[1] 杨华,顾强,刘洪,等. 城市配电网综合管理系统研究[J]. 高压技术,2006,32(11):153-156.  
YANG Hua, GU Qiang, LIU Hong, et al. Research on integrated management system of distribution network [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 153-156.

[2] 翁颖钧,朱仲英. 基于 WebGIS 的配电网调度管理系统[J]. 电力系统自动化,2003,27(18):83-86.  
WENG Yingjun, ZHU Zhongying. A dispatch management system for the strategy WebGIS-based distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 83-86.

- [3] 万国成,任震,吴日昇,等. 混合法在复杂配电网可靠性评估中的应用[J]. 中国电机工程学报,2004,24(9):92-98.  
WAN Guocheng,REN Zhen,WU Risheng,et al. Hybrid method for the reliability evaluation of the complex distribution system[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(9):92-98.
- [4] 杨京燕,倪伟,肖湘宁,等. 计及电压暂降的配电网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报,2005,25(18):28-33.  
YANG Jingyan,NI Wei,XIAO Xiangning,et al. Reliability evaluation of distribution network considering voltage SAGS[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(18):28-33.
- [5] 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. Study on model of reliability-network-equivalent of distribution system reliability evaluation[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(5):48-52.
- [6] 刘健,杨文宇,余建明,等. 基于改进最小生成树算法并考虑负荷不确定性的配电网架最优规划[J]. 电网技术,2005,29(16):61-65.  
LIU Jian,YANG Wenyu,YU Jianming,et al. Optimal distribution network planning based on improved minimal cost spanning tree algorithm and considering indeterminacy of power loads[J]. Power System Technology,2005,29(16):61-65.
- [7] 孔涛,程浩忠,王建民,等. 城市电网网架结构与分区方式的两层多目标联合规划[J]. 中国电机工程学报,2009,29(10):59-66.  
KONG Tao,CHENG Haozhong,WANG Jianmin,et al. United urban power grid planning for network structure and partition scheme based on bi-level multi-objective optimization with genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(10):59-66.
- [8] 卢志刚,刘健,吴杰,等. 人工鱼群算法在配电网网架规划中的应用[J]. 高电压技术,2008,34(3):565-568.  
LU Zhigang,LIU Jian,WU Jie,et al. Application of artificial fish swarm algorithm in power distribution network planning[J]. High Voltage Engineering,2008,34(3):565-568.
- [9] 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 Tingji,CHENG Haozhong,HE Ming,et al. Research on connection modes of urban middle voltage distribution networks[J]. Power System Technology,2000,24(9):35-38.
- [10] 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 Chengshan,WANG Saiyi,GE Shaoyun,et al. Economy and reliability analysis of different connection modes in MV distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(24):34-39.
- [11] 葛少云,张国良,申刚,等. 中压配电网各种接线模式的最优分段[J]. 电网技术,2006,30(4):87-91.  
GE Shaoyun,ZHANG Guoliang,SHEN Gang,et al. Optimal sectioning of connection modes in medium voltage distribution systems[J]. Power System Technology,2006,30(4):87-91.
- [12] 谢堂华,王成山,葛少云,等. 城市配电网接线模式经济性和可靠性分析[J]. 电力自动化设备,2005,25(7):12-16.  
XIE Yinghua,WANG Chengshan,GE Shaoyun,et al. Economy and reliability analysis of connection modes in urban distribution networks[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(7):12-16.
- [13] 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 Shaoyun,GUO Mingxing,WANG Chengshan, et al. Comparative study of connection modes in high-voltage distribution networks[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(2):33-37.
- [14] 顾洁,孟畅. 配电网接线模式研究[J]. 电力自动化设备,2002,22(7):19-22.  
GU Jie,MENG Yang. Research on connection mode of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(7):19-22.
- [15] 施卫杰,潘锋. 10 kV 中压配电网目标网架建设初探[J]. 供用电,2007,24(3):17-19.  
SHI Weijie,PAN Feng. Initial exploration of target grid construction dealing with 10 kV MV distribution network[J]. Distribution & Utilization,2007,24(3):17-19.
- [16] 潘锋,张敏华. 中压配电网评估及目标网架建设初探[J]. 上海电力,2008(1):91-93.  
PAN Feng,ZHANG Minhua. Assessment of MV distribution network and initial exploration of target grid construction[J]. Shanghai Electric Power,2008(1):91-93.
- [17] 王成山,罗凤章,肖峻,等. 基于主变互联系数的配电系统供电能力计算方法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(13):86-91.  
WANG Chengshan,LUO Fengzhang,XIAO Jun,et al. An evaluation method for power supply capability of distribution system based on analyzing interconnections of main transformers[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(13):86-91.
- [18] 葛少云,韩俊,刘洪,等. 计及主变过载及联络容量约束的配电系统供电能力计算方法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(25):97-103.  
GE Shaoyun,HAN Jun,LIU Hong,et al. Power supply capability determination considering constraints of transformer overloading and tie-line capacity[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(25):97-103.
- [19] 杨明海,刘洪,王成山,等. 中压配电系统供电模型研究[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2011,47(4):382-386.  
YANG Minghai,LIU Hong,WANG Chengshan,et al. Power supply model of medium-voltage distribution system[J]. Journal of Beijing Normal University:Natural Science,2011,47(4):382-386.

#### 作者简介:

葛少云(1964-),男,天津人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事城市电网规划和配电系统自动化等方面的研究和教学工作(E-mail:syge@tju.edu.cn);

韩俊(1985-),男,江苏扬州人,博士研究生,主要从事城市电网规划方面的研究和应用工作;

刘洪(1979-),男,天津人,讲师,博士,主要从事城市电网规划、评估等方面的研究和应用工作;

刘阳(1988-),男,湖南常德人,硕士研究生,主要从事城市电网规划方面的研究和应用工作;

王赛一(1978-),男,上海人,高级工程师,博士,主要从事城市电网规划方面的工作;

朱永卫(1966-),女,上海人,工程师,主要从事城市电网规划方面的工作;

程正敏(1963-),男,上海人,工程师,主要从事城市电网规划方面的工作;

梁忆辰(1966-),女,上海人,工程师,主要从事城市电网规划方面的工作。

(下转第 35 页 continued on page 35)

- 的电压控制分区[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(12):69-73.
- KANG Yong,LI Huaqiang,ZHENG Wu,et al. Voltage control partitioning based on energy sensitivity matrix and fuzzy clustering analysis[J]. Power System Protection and Control,2011,39(12):69-73.
- [13] STUBBE M. Long term dynamics phase II [R]. Madrid,Spain: CIGRE Task Force,1995.
- [14] KARLSSON D,HILL D J. Modeling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems,1994,9(1):157-163.
- [15] RICHARD E. GAMS-A users guide[M]. Washington DC,USA:

- GAMS Development Corporation,2010:15-16.
- [16] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,1995:32-64.

#### 作者简介:

- 张 岩(1986-),男,山东泰安人,博士研究生,研究方向为电力系统电压稳定与控制(E-mail:zysol@126.com);
- 张 文(1966-),女,山东淄博人,教授,博士,研究方向为电力系统优化运行、智能算法及其在电力系统中应用;
- 王 亮(1979-),男,山东荣成人,高级工程师,博士,主要从事电力系统运行与控制方面的技术工作。

## Coordinated voltage control with CDSRS based on fuzzy clustering analysis

ZHANG Yan<sup>1</sup>,ZHANG Wen<sup>1</sup>,WANG Liang<sup>2</sup>

- (1. School of Electrical Engineering,Shandong University, Ji'nan 250061,China;  
2. Shandong Electric Power Dispatch Center, Ji'nan 250001,China)

**Abstract:** Based on the model predictive control,a method of coordinated voltage control with CDSRS (Candidate Decision Set Rolling Selection) is proposed. By obtaining the response characteristic of optimal objective node voltage to control variable in the prediction period,the task to solve the coordinated voltage control model is converted into that to carry out the mixed-integer linear programming. According to the locality of voltage control and with the predicted voltage amplitude and response information obtained during the model prediction as the clustering feature indexes,the fuzzy clustering method is applied to determine the optimal objective node after fault,based on which,the CDSRS is carried out according to the significance degree of voltage response. Simulative results show that,under the premise of global coordinated control performance,the scale of candidate decision sets is significantly decreased and the time of optimization calculation is obviously reduced,effectively avoiding the problem of decision set explosion in coordinated voltage control.

**Key words:** voltage control; fuzzy clustering; decision set selection; optimization; model predictive control; models

(上接第 20 页 continued from page 20)

## Analysis model of 10 kV backbone network in center area

GE Shaoyun<sup>1</sup>,HAN Jun<sup>1</sup>,LIU Hong<sup>1</sup>,LIU Yang<sup>1</sup>,WANG Saiyi<sup>2</sup>,  
ZHU Yongwei<sup>2</sup>,CHENG Zhengmin<sup>2</sup>,LIANG Yichen<sup>2</sup>

- (1. Key Laboratory of Smart Grid,Ministry of Education,Tianjin University,Tianjin 300072,China;  
2. Urban Power Supply Company,SMEPC,Shanghai 200080,China)

**Abstract:** An analysis model of medium voltage distribution network is built for analyzing and generalizing the structure of 10 kV backbone network. Combined with the basic concept of layered and blocked medium distribution network,the concept of 10 kV backbone network and secondary network are defined to set the hierarchy and functional orientation of medium voltage distribution network,and combined with the requirements for high power supply ability and reliability of distribution network in center area,a contact model of typical power block and a binding analysis model of space distribution for substations and K-stations are constructed based on K-type power supply mode,which provides the theoretical basis for improving the power supply level of backbone network and properly planning the power service areas. To verify the rationality and validity of the proposed model,the parameter boundary conditions of a distribution network in center area are set according to its actual operational situation and the corresponding model analysis and calculation are carried out.

**Key words:** distribution network; layered and blocked; backbone network; electric substations; models; electric network analysis