

城市高负荷密度地区 220/20 kV 供电方案研究

黄磊¹, 程浩忠¹, 欧阳武¹, 姚白沙², 吴争², 董震威²

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 无锡供电公司, 江苏 无锡 214001)

摘要: 经过江苏省许多地市的实践, 中压配电电压由 10 kV 升高为 20 kV 已被证明是可行的。220/110/20 kV 三级电压制供电系统由于相邻电压数值之间的比例减小, 导致供电区域重叠, 设备的供电能力不能充分发挥。以江苏某市为例, 提出以规划年单位负荷供电费用为评价指标的数学模型, 并运用计算几何中的 Voronoi 图, 优化 220 kV 变电站的供电区域。在此基础上通过计算规划年不同负荷密度下 220/110/20 kV 供电系统和 220/20 kV 供电系统的单位负荷供电费用, 得出在一定条件下当城市负荷密度发展到一定水平时, 采用 220/20 kV 供电方案将获得较小单位负荷供电费用的初步结论。因此建议当城市发展到该负荷密度水平时采用 220/20 kV 的供电方案, 以避免重复降压, 并为今后进一步优化高压配电电压做好准备。

关键词: 供电方案; 负荷密度; 电压制; 城市电网规划; 220/20 kV; Voronoi 图

220/20kV power supply scheme in high load density urban areas

HUANG Lei¹, CHENG Hao-zhong¹, OUYANG Wu¹, YAO Bai-sha², WU Zheng², DONG Zhen-wei²

(1. Dept of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214001, China)

Abstract: Application of 20kV in MV distribution system has been proved to be feasible and advisable with the rapid growing load density in urban areas. The decreasing of gap between neighboring voltage value in the existing 220/110/20kV sequence results in overlapping in power supply area and that the capacity of devices in system cannot be in full use subsequently. Assuming the load in the area is uniformly distributed, this paper proposes a mathematical model with a decision-making index based on power supply cost per unit load and makes a Voronoi diagram based 220kV substation optimal supply area. A case study of a real distribution system in Jiangsu province is employed to make a comparison of the cost per unit load in the horizontal year in both 220/110/20kV and 220/20kV system. Preliminary conclusion about reasonable load density of higher than a certain level is appropriate for voltage sequence in power supply system in special conditions is presented. And it also makes a further suggestion that 110kV be eliminated from the existing voltage sequence in urban distribution system with this load density for avoiding overlapping in voltage stepping down and also getting ready for further HV distribution voltage optimization.

Key words: power supply scheme; load density; voltage series; urban power grid planning; 220/20kV; Voronoi diagram

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)20-0001-06

0 引言

城市电网供电电压的确定, 对城市发展及现代化程度的提高有着深远的意义。目前我国各省会城市和沿海发达城市先后建立了 500 kV 或 220 kV 的超高压外环网、双环网, 我国城市电网的电压等级配置基本分 5 级, 电压等级的划分基本上以 500 kV、330 kV、220 kV 为输电电压等级, 以 110 kV、35 kV 为高压配电电压等级, 以 20 kV、10 kV 为中压配电电压等级^[1]。文献[2~4]肯定了城市高负荷密度地区采用 20 kV 的

经济技术优越性; 江苏省一些城市电网的实践也证实了中压配电电压由 10 kV 升高为 20 kV 是可行的。然而, 三级电压供电方案下, 110 kV 和 220 kV 变电层级小, 不符合“求三舍二”原则^[5], 其暴露出的缺点, 如两级电压供电面积重叠多、变电设备容量重复建设以及网损大, 仍然没有得到解决。

因此, 探索与 20 kV 中压配电电压相对应的高压配电电压等级, 研究高负荷密度地区采用 220/20 kV 代替 220/110/20 kV 供电方案的可行性, 以简化电压等级、减少变电层次, 成为中压采用 20 kV 之后所带来的新问题。鉴于 110 kV 电压等级在我国电网中存在时间长, 分布范围广, 牵扯面大, 要想

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助 (2009CB219703)

使得电网平稳过渡到不含该电压等级的状态而需要考虑的因素十分复杂。本文借鉴巴黎城网的供电方案的特点^[6,7], 对此问题做了一些探索性的研究, 以规划年单位负荷供电费用为决策指标, 通过计算得出在 220/110/20 kV 既定电压制下逐步取消 110 kV, 将高压配电电压提高至 220 kV 的合理负荷密度, 供电力系统规划设计部门参考。

1 数学模型

随着负荷密度的不断增长, 不同电压制的供电总费用必定不同, 故提出以规划年单位负荷供电费用为经济性评估指标的数学模型。对于不同的电压制供电系统, 计算其规划年单位负荷的供电费用, 作为衡量电压制优劣的经济性指标。假定某地区规划年负荷均匀分布。在不同的电压制供电方案下, 求得单位负荷的综合供电费用。假定第 k 级单座变电站主变容量为 S_{Tk} (MVA), 主变台数为 n_k 。建立以下的数学模型:

$$\min \frac{\sum_{k=1}^M (C_{l,k} + C_{s,k+1})}{\delta * A} \quad (1)$$

其中: σ 为负荷密度, MW/km²; A 为供电区域面积, km²; $C_{l,k}$ 和 $C_{s,k+1}$ 分别表示供电区域内第 k 级线路及其上级电源变电站的综合费用; M 为电压等级数, 若采用 220/20 kV 电压制, M 取 2; 若采用 220/110/20 kV 电压制, M 取 3。本文中, 220 kV 对应第 $M+1$ 级, 20 kV 开关站出线对应第 1 级。220/110/20 kV 电压制中, 20 kV 开关站出线对应第 1 级, 20 kV 开关站和 20 kV 线路为第 2 级, 110 kV 变电站及 110 kV 线路为第 3 级, 等等。若采用 220/20 kV 电压制, 情况类似。

2 模型求解

假设分压负荷比例, 即第 k 级网络的分压负荷比例为 α_k ; 第 k 级网络容载比 β_k ; 20 kV 开关站采用 2 回进线。则第 $k(k \geq 3)$ 级变电总容量 S_k 为:

$$S_k = \delta * A * \alpha_{k-1} * \beta_k \quad (2)$$

第 k 级变电站座数:

$$N_k = \text{ceiling} \left(\frac{S_k}{S_{Tk} n_k} \right) \quad (3)$$

式 (3) 中函数 $\text{ceiling}()$ 表示向上取整函数。这样, 得到了供电区域内各级变电站 (开关站) 的座数 N_k , $k=2, 3, 4, \dots, M+1$ 。

供电区域内各级变电站 (开关站) 的座数确定之后, 接下来需要确定的是它们各自的供电区域。

2.1 基于 Voronoi 图的供电区域划分

文献[8]建立了变电站经济供电半径优选的几何规划和 Fuzzy 几何规划模型, 为城市变电站最经济供电半径以及最佳容量的确定^[9-11], 和变电站个数的合理设置, 提供了科学的依据。本文引入计算几何学中的 Voronoi 图来确定变电站 (开关站) 的最优供电区域^[12,13]。在计算几何学中, Voronoi 图是一个重要的几何结构, 在求解点集或其它几何对象与距离有关的问题时起重要作用。

将 Voronoi 图结合到变电站供电区域优化中, 假定平面 A 内有变电站集合 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 。 $\forall S_i \in S, i=1, 2, \dots, n$, 集合 $A_i = \{S \in A | d(S, S_i) < d(S, S_j), i \neq j\}$ 称为变电站 S_i 的 Voronoi 域。其边界称为变电站 S_i 的 Voronoi 多边形。凡是在变电站 S_i 的 Voronoi 域中的点到变电站 S_i 的距离都比该点到变电站集合 S 中其它变电站的距离近。对平面 A 上的每个变电站都可以作出一个 Voronoi 多边形, 这样由 n 个 Voronoi 多边形组成的图称为 Voronoi 图。平面上含有六个变电站的 Voronoi 图如图 1 所示: 该图中的顶点 A、B、C、D、E 和边 AB、BC、CD、DA、AF、BG、CH、DE、EI 和 EJ 分别被称为 Voronoi 顶点和 Voronoi 边。显然, 这 n 个变电站的 n 个 Voronoi 多边形组成的 Voronoi 图, 将平面 A 划分成了 n 个区域, 每个区域包含且仅包含一个变电站。Voronoi 边即可表示变电站供电区域的边界。如, 变电站 S_1 的供电区域即为 Voronoi 边 AB、BC、CD、DA 围成的四边形。

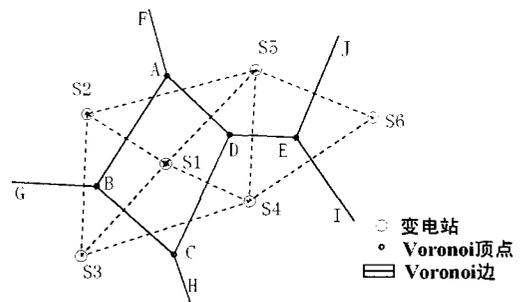


图 1 含有六个变电站的平面 Voronoi 图

Fig.1 A plane Voronoi plot with six substations

文献[14,15]给出了已知平面 A 上变电站集合 S 作该平面的 Voronoi 图的算法。

设供电区域 A 上均匀分布有变电站集合 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, 这些变电站的电压等级和容量

均相同。要确定每个变电站的供电区域,问题实质是,对每个变电站 S_i , 找出一个区域,使得在这个区域中的任何负荷点 P_{S_i} , 到变电站 S_i 的距离小于该负荷点到其它任意一座变电站的距离,即满足 $d(P_{S_i}, S_i) < d(P_{S_i}, S_j)$, ($i \neq j$)。由 Voronoi 图的定义可知,与每个变电站 S_i 关联的 Voronoi 域即是该变电站的供电区域。所以,作出含有 n 个变电站的供电区域 A 的 Voronoi 图,即可确定每个变电站的供电区域。

对第 k 级变电站(开关站)的集合 $S_k = \{S_{1k}, S_{2k}, \dots, S_{nk}\}$ 来说,其上级变电站的供电区域已经划分好,该集合中的变电站已经被分配到上级变电站各自的供电区域中。计算集合 S_k 的供电区域时,只需以上级变电站的供电区域为单位,分别计算该区域内每个第 k 级变电站的供电区域即可。

江苏省某市 2020 年远景当负荷密度 σ 达到 30 MW/km² 时, 220/20 kV 及 220/110/20 kV 电压制供电方案下 220 kV 变电站供电区域划分比较如图 2。

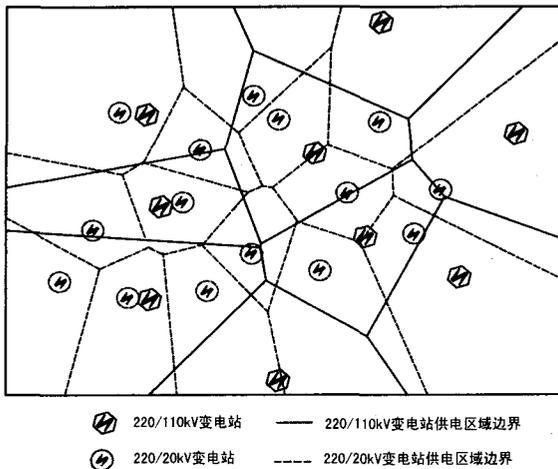


图 2 220/20 kV 及 220/110/20 kV 供电方案的 220 kV 变电站供电区域划分比较图

Fig.2 Plot of substation supply areas comparison in 220/20 kV&220/110/20kV power supply scheme

由图 2 可知, 220/20 kV 变电站的供电区域较 220/110 kV 的为小,在一定程度上兼顾了 220/110/20 kV 电压制中 220 kV 变电站和 110 kV 变电站联系 220 kV 系统和 20 kV 系统的纽带作用,减少了 220 kV 系统和 110 kV 系统的重复供电范围。各级变电站的供电区域划分好之后,下面计算整个供电区域规划年的供电费用,包括各级线路和变电站固定费用及

年运行费用。下面主要讨论 $C_{l,k}$ 和 $C_{s,k+1}$ 的计算方法。

2.2 线路投资

第 k 级配电网主干线建设投资费用(万元/回):

$$Z_{lk} = L_k \left(a_{lk} \frac{S_k \cos \varphi_k}{P_{avk}} + b_{lk} S_{lk} \right) = E_k R_k \left(a_{lk} \frac{S_k \cos \varphi_k}{P_{avk}} + b_{lk} S_{lk} \right) \quad (4)$$

其中: R_k 是第 k 级配电网每回线路直线长度, km; E_k 是线路曲折系数,与线路走廊的地形有关; S_k 为第 k 级配电网每回线路额定输送容量, MVA; φ_k 为第 k 级配电网每回线路功率因数角; P_{avk} 为第 k 级配电网每回线路实际平均输送有功功率, MW; a_{lk} 、 b_{lk} 是分别表征配电网主干线建设投资费用与线路截面无关和与线路截面呈线型关系的比例系数; S_{lk} 为第 k 级配电网线路截面型号, mm²。

2.3 变电站投资

第 k 级变电站建设投资费用:

$$Z_{sk} = a_{sk} + b_{sk} S_{Tk}^p n_k^{2-p} \quad (5)$$

其中: a_{sk} 、 b_{sk} 是分别表征变电站建设投资费用与变电站主变容量无关和与变电站主变容量有关的比例系数。由于变电站主变台数的增多,将导致出线断路器的增多,考虑到采用 220/20 kV 主变时,出口 20 kV 断路器的开断电流很大,导致其造价昂贵,故在 220/20 kV 变电站中 p 取为 0.5,即认为主变台数对变电站造价的影响大于单台主变容量的影响,赋予主变台数相对于主变容量更高的价格指数;而在 220/110 kV 或者 110/20 kV 变电站中, p 可酌情选取为 1 左右。

2.4 运行费用

各级配电网及其上级变电站的运行费用包含不变部分和可变部分,分别计算如下:

对不变部分,有:

$$C_{l,k} = \Delta p \tau C_k = 7.26 \frac{E_k \rho_k J \tau C_k}{U_{Nk} \cos^2 \varphi \sqrt{\sigma}} S_k^{1.5} \quad (6)$$

其中: C_{ks} 是第 k 级网络及其上级变电站运行费用的不变部分,包括折旧费用、人员维护费用等, H 是对总投资提取年运行费的年提取系数。

对可变部分,有:

$$C_{kd} = C_{l,k} + C_{s,k+1} \quad (7)$$

C_{kd} 是第 k 级网络及其上级变电站运行费用的可变部分, 包括第 k 级网络的可变运行费用 $C_{l,k}$ 和上级变电站的可变运行费用 $C_{s,k+1}$ 。其中,

$$C_{l,k} = \Delta p \tau C_k = 7.26 \frac{E_k \rho_k J \tau C_k}{U_{Nk} \cos^2 \varphi \sqrt{\sigma}} S_k^{1.5} \quad (8)$$

其中: ρ_k 是 k 级网络每回线路的导线电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$; J 是经济电流密度, A/mm^2 ; τ 是第 k 级网络的最大负荷损耗时间, h ; C_k 是 k 级网络的电价, 元/ kWh 。

$$C_{s,k+1} = (8760 C_{k+1} k_{\text{Fe}} + C_{k+1} \tau_s k_{\text{Cu}}) S_{\text{NL},k+1}^{0.75} \quad (9)$$

其中: k_{Fe} 是变压器铁损系数, $\text{kW}/\text{kVA}^{0.75}$; τ_s 是变压器铜耗等值小时数; k_{Cu} 是变压器铜耗系数, $\text{kW}/\text{kVA}^{0.75}$; $S_{\text{NL},k+1}$ 是第 $k+1$ 级变电站变压器额定负荷, MVA 。

由式 (5) ~ (9), 代入式 (1), 得到:

$$\min \frac{\sum_{k=1}^M (Z_{lk} + Z_{sk} + C_{ks} + C_{kd})}{\delta^* A} \quad (10)$$

可得规划年不同电压制供电方案下单位供电费用。

3 计算实例

以江苏省某市为例, 当规划年负荷密度 σ (单位: MW/km^2 , 下同) 由 20 增长到 80 时分别计算 220/20 kV (下称二级电压制) 和 220/110/20 kV (下称三级电压制) 两种电压制下单位供电容量的费用 (单位: 万元, 下同)。

计算边界条件按照相关规定^[16~18]设置:

(1) 220/20 kV 变电站采用 3 台主变, 单台主变容量考虑 100 MVA; 220/110 kV 变电站采用 3 台主变, 单台主变容量考虑 240 MVA; 110/20 kV 变电站可采用 3 台主变, 单台主变容量考虑 80 MVA。

(2) 整个供电面积 100 km^2 。

在上述前提下, 分别求得 220/20 kV 和 220/110/20 kV 两种电压制供电方案下单位负荷供电费用。

随着负荷密度的增大, 两种电压制下, 单位负荷供电费用如图 3; 全网最大电压损耗如图 4; 全网网损率如图 5。

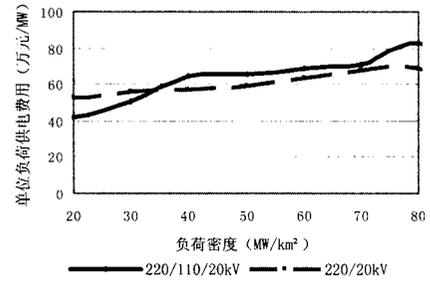


图 3 单位负荷供电费用

Fig.3 Power supply cost per unit load

由图 3 可以看出, 当负荷密度小于 35 MW/km^2 时, 采用三级电压制比采用二级电压制将获得较小的单位负荷供电费用; 当负荷密度高于 35 MW/km^2 时, 情况发生了质的变化, 采用二级电压制将获得较小的单位负荷供电费用。在整个 20~80 MW/km^2 的负荷密度区间上, 不论采用哪种电压制, 单位负荷供电费用总体呈现上升趋势, 且采用二级电压制较三级电压制而言, 由于节省了 110 kV 等级系统相关的投资和运行费用, 使得其上升趋势较缓。

用二级电压制代替三级电压制, 实际上等效于在满足同样供电容量的前提下, 取消 110 kV 级变电站及 110 kV 线路, 同时延长 220 kV 线路和 20 kV 线路, 增加 220 kV 变电站的数量, 并降低 220 kV 变电站的容量。在这一过程中, 20 kV 断路器需要开断的电流增大, 导致其价格骤升。

当负荷密度水平较低时, 20 kV 开关站的电源由原来的 220 kV 和 110 kV 两级电压系统变为 220 kV 单级电压系统, 节省了 110 kV 变电站和 110 kV 线路的费用, 但增加了 220 kV 变电站数量, 计算表明, 由此而增加的 20 kV 断路器等开关设备的费用等将抵消甚至超过节省下来的相对较少的 110 kV 变电站和 110 kV 线路的费用, 因此是不经济的。而当负荷密度较高时, 110 kV 变电站和 110 kV 线路数量均较多, 费用也较多, 用二级电压制取代三级电压制, 由此节省的 110 kV 变电站和 110 kV 线路的费用将抵消甚至超过由于增加 220 kV 变电站数量, 并且由此增加的 20 kV 断路器等开关设备的费用, 故此时呈现较好的经济性。

图 4 说明了两种电压制下全网最大电压损耗随负荷密度增长变化的情况。显然, 采用二级电压制, 比采用三级电压制, 有更小的电压损耗。随着负荷密度的增长, 采用二级电压制时, 取消了 110 kV 变电站, 减少了 110 kV 变电站主变的电压损耗, 从而使得二级电压制跟三级电压制相比有更小的电压损

耗。

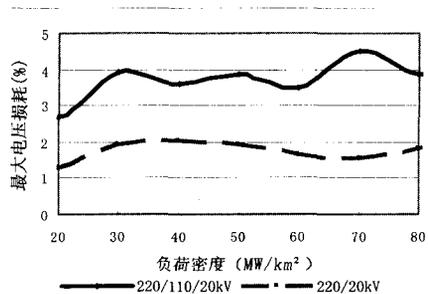


图4 全网最大电压损耗

Fig.4 Maximum voltage loss of whole grid

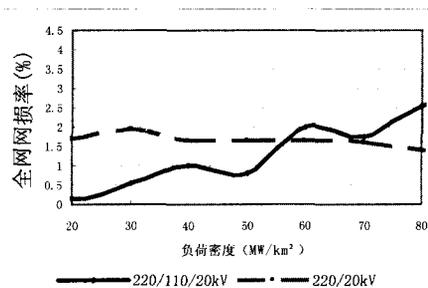


图5 全网网损率

Fig.5 Energy loss rate in the grid

图5说明了两种电压制下全网网损率随负荷密度增长变化的情况。当负荷密度小于 55 MW/km^2 时,采用三级电压制比采用二级电压制有更小的网损率;当负荷密度超过 55 MW/km^2 时,在三级电压制中,全网网损率以较快速度上升最后趋于 3.5% 左右;在二级电压制中,全网网损率波动前进,但基本维持在相对三级电压制而言较低的水平。

随着负荷密度的增长,在 $20\sim 80 \text{ MW/km}^2$ 的负荷密度范围内,三级电压制相比二级电压制而言,由于多了 110 kV 级变电站,导致全网网损率相对而言迅速增大,并最终稳定到较高的水平。尤其是负荷密度超过 55 MW/km^2 ,由于 $220/20 \text{ kV}$ 供电方案中由于 220 kV 变电站数目较多而增加的网损迅速被 $220/110/20 \text{ kV}$ 供电方案中大量额外的 110 kV 主变引起的网损超过,导致网损率较低。因此,即使当城市负荷密度发展到 35 MW/km^2 时由于其它原因不能将与 20 kV 相对应的高压配电电压提高为 220 kV ,在未来城市负荷密度发展到更高的 55 MW/km^2 的水平时,从降低能耗的角度来讲,此时采用 $220/20 \text{ kV}$ 电压制供电方案也是有积极意义的。

4 结论

本文研究了不同负荷密度水平下 $220/110/20 \text{ kV}$ 三级电压制供电方案中取消 110 kV 电压等级的可行性。计及从 500 kV 变电站低压侧出线到 20 kV 开关站高压侧进线之间所有变电站和线路的建设费用和年运行费用,采用Voronoi图确定各级变电站的合理供电范围,并在此基础上计算了不同负荷密度水平下两种电压制供电方案各自的单位负荷供电费用、全网最大电压损耗、全网网损率三个经济及技术性指标,并以单位负荷供电费用为最终决策指标。通过本文计算,可得下面结论:

(1) 在一定条件下,当城市负荷密度高于 35 MW/km^2 时,采用二级电压制跟三级电压制相比,节省的 110 kV 变电站和相应的 110 kV 线路投资以及相应的网损费用将超过增加的 220 kV 变电站投资及其站内损耗费用,从而总体上将获得较小的单位负荷供电费用。

(1) 在 $20\sim 80 \text{ MW/km}^2$ 的负荷密度范围内,二级电压制跟三级电压制相比,有更小的电压损耗。

(2) 当负荷密度大于 55 MW/km^2 时,二级电压制跟三级电压制相比,由于减少的 110 kV 这一级线路和变压器损耗超过 220 kV 变压器增加的损耗,从而总体上全网损耗减少。

综上所述,在一定条件下,当城市负荷密度高于 35 MW/km^2 时,采用 220 kV 直降 20 kV 供电方案会取得较好的经济技术效益。这对于提高与 20 kV 中压配电电压相对应的高压配电电压,以及系统简化电压等级、减少变电层次、降低网络损耗具有重要现实意义。

参考文献

- [1] 范明天,张祖平,刘思革.城市电网电压等级的合理配置[J].电网技术,2006,30(10):64-68.
FAN Ming-tian, ZHANG Zu-ping, LIU Si-ge. Rational Scheming of Voltage Levels in Urban Electric Networks[J]. Power System Technology, 2006, 30 (10):64-68.
- [2] 姜祥生,汪洪业,姚国平.苏州工业园区20千伏电压等级的实践[J].供用电,2002,19(6):9-11.
JIANG Xiang-sheng, WANG Hong-ye, YAO Guo-ping. Practice of 20 kV Voltage Application in Suzhou Industrial Park[J]. Distribution & Utilization, 2002, 19

- (6):9-11.
- [3] 姜祥生. 苏州工业园区 20kV 配电工程[J]. 电网技术, 1997,21(2):56-58.
JIANG Xiang-sheng. The 20kV Electric Power Distribution in Suzhou Industrial Development Zone[J]. Power System Technology, 1997,21(2):56-58.
- [4] 姜祥生, 唐德光. 苏州工业园区配电网电压等级论证[J]. 供用电, 1995, (1):8-20.
- [5] 谈文华, 万载扬. 科技进步与电网发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [6] 张智珉. 法国电力规划的特点[J]. 华东电力, 1993, (12):49-52.
- [7] TEL T R, Moun A M. 柏林与巴黎的供电比较[J]. 国际电力, 1999, 3(4):49-52.
TEL T R, Moun A M. Comparison of the Power Supply of Berlin and Paris[J]. International Electric Power for China, 1999, 3(4):49-52.
- [8] 曹炳元. 几何规划和含 Fuzzy 系数的几何规划在城市变电所供电半径选择中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2001, (7):92-95.
CAO Bing-yuan. Application of Geometric Programming and Geometric Programming with Fuzzy Coefficients in Seeking Power Supply Radius of Transformer Substation Systems[J]. Engineering-theory & Practice, 2001, (7):92-95.
- [9] 刘自发, 张建华. 基于改进多组织粒子群体优化算法的配电网变电站选址定容[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 105-111.
LIU Zi-fa, ZHANG Jian-hua. Optimal Planning of Substation Locating and Sizing Based on Refined Multi-team PSO Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1):105-111.
- [10] 杨丽徙, 朱向前, 陈根永, 等. 基于 Voronoi 图的变电站优化规划方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(5):22-25.
YANG Li-xi, ZHU Xiang-qian, CHEN Gen-yong, et al. Substation Optimal Planning Method Based on Voronoi Diagram[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2006, 18(5):22-25.
- [11] 王成山, 魏海洋, 肖峻, 等. 变电站选址定容两阶段优化规划方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 62-66.
WANG Cheng-shan, WEI Hai-yang, XIAO Jun, et al. Two-phase Optimization Planning Approach to Substation Locating and Sizing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4):62-66.
- [12] Held M, Williamson R B. Creating Electrical Distribution Boundaries Using Computational Geometry[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3):1342-1347.
- [13] Navarro A, Rudnick H. Large-Scale Distribution Planning—Part II: Macro-Optimization with Voronoi's Diagram and Tabu Search[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(2):752-758.
- [14] 周培德. 计算几何——算法分析与设计(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [15] De Berg M. 计算几何——算法分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [16] 江苏省电力公司. 20kV 配电系统技术导则[Z]. 2007.
- [17] 国家电网公司. 城市电力网规划设计导则[Z]. 2006.
- [18] 上海市电力公司. 上海中、低压电网配置原则及典型设计[Z]. 2006.

收稿日期: 2009-06-09

作者简介:

黄磊(1983-), 男, 硕士研究生, 现从事电力系统规划方面的研究; E-mail: lomac@sjtu.edu.cn

程浩忠(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 现从事电力系统规划、电压稳定性、电能质量等方面的教学科研工作;

欧阳武(1978-), 男, 博士研究生, 现从事电力系统规划方面的研究。