

农村电网合理配电方式的优化选择

赵明 汤红卫*

(中国农业大学 信息与电气工程学院,北京 100083)

摘要 为降低农村电网的投资和运行费用,在满足负荷需求及各项技术指标限制的条件下,以线路电压降和变电站最大负荷限制为控制条件,建立各种配电方式的单位供电面积年费用与线路供电半径、变电站数量、负荷密度等因素之间的函数关系,对我国农村电网3种配电方式110/35/10 kV、110/20 kV、110/10 kV的经济性进行研究和比较。结果表明:当负荷密度低于 $250 \text{ kW}/\text{km}^2$ 时,110/10 kV配电方式的单位供电面积年费用相对较低,而负荷密度高于 $250 \text{ kW}/\text{km}^2$ 时,110/20 kV的配电方式则更经济;而110/35/10 kV配电方式因为使用广泛且经济性与另外2种配电方式接近,仍有很高的保留价值。

关键词 农村电网; 配电方式; 负荷密度; 供电半径; 优化选择

中图分类号 TM 715

文章编号 1007-4333(2012)04-0159-06

文献标志码 A

Research of reasonable distribution modes of rural power grids

ZHAO Ming, TANG Hong-wei*

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract In order to reduce the investment and operating costs of rural power grid, we developed a model to describe the effects of annual cost of unit supply area on the radius of line power supply, the number of substations and the density of load, by using the line voltage drop and the maximum load limit as control conditions, under the demand of load and the limits of technical indices. The comparisons of economies of three modes of power distribution of China's rural power grid, 110/35/10 kV, 110/20 kV and 110/10 kV, were performed by the approach above. The results show that when the load density is below $250 \text{ kW}/\text{km}^2$, the annual cost of 110/10 kV distribution mode is the lowest; when the load density is greater than $250 \text{ kW}/\text{km}^2$, 110/20 kV distribution is the most economical; and for 110/35/10 kV distribution mode, there is still high value to preserve it due to its widely use and the similar cost to the other two distribution modes.

Key words rural power grid; distribution modes; load density; power supply radius; optimal selection

随着电力负荷的不断增长,110/10 kV和110/20 kV配电方式越来越多地出现在农村电网中^[1]。现阶段,国际上许多国家采用110/20 kV的配电方式,这种配电方式具有较高的供电能力和供电可靠性。在国内,部分省已开始推广20 kV电压等级试点供电项目,由于国内20 kV电气设备生产能力并不完善,存在建设成本相对较高、运行经验少、与其他区域电网配合困难等问题,还未得到广泛应用。这种条件下,对各种配电方式的经济性进行比较,合理选择经济性较好的配电方式对降低农村电网的投资和运行费用具有重大意义^[2-3]。110/35/10 kV是

我国农村电网中现有的主要配电方式^[4-5]。随着负荷密度的增加,110/35/10 kV配电方式可能需要增加35 kV变电站数量,从而引起变电站年费用增加,10 kV线路上的年费用也会增大。在满足同样技术条件下与110/20、110/10 kV等配电方式比较,可能造成其经济性未必最佳^[6-8]。因此对于不同的负荷密度,必然存在一个合理的配电方式使得年费用尽可能小。

本研究拟通过对不同负荷密度下各配电方式单位面积年费用的比较,寻找经济性最佳的配电方式,并以此为根据对不同功率因数、变电站出线条数的

收稿日期:2012-02-03

基金项目:国家“十一五”科技支撑项目(2006BAJ04B06)

第一作者:赵明,硕士研究生,E-mail:zhaoming1989@hotmail.com

通讯作者:汤红卫,副教授,主要从事电力系统专业研究,E-mail:tang7643@163.com

农村电网进行配电方式的优化选择。

1 农村电网模型

1.1 农村电网顺序接线模型

我国各地农村电网网架结构差异很大，总体

上分为环形电网和放射电网，以放射电网为主。对于 110/35/10 kV 和 110/20 kV (110/10 kV 配电方式网架结构与 110/20 kV 配电方式网架结构相同) 2 种配电方式，农村电网顺序接线模型见图 1^[9-10]。

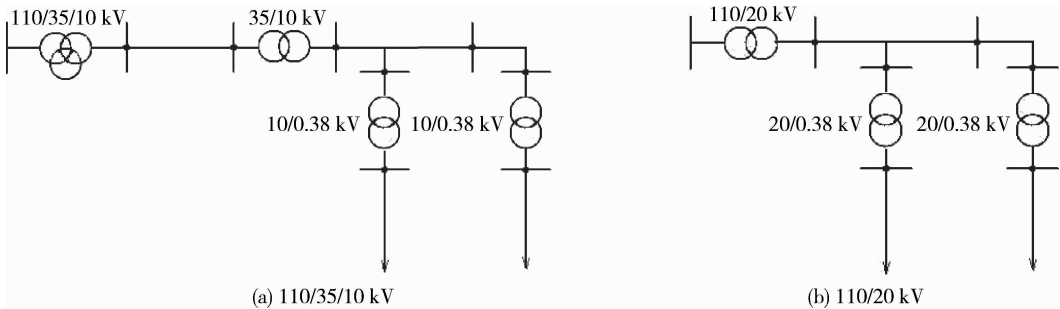


图 1 农村电网顺序接线模型

Fig. 1 Order wiring model for rural power grid

1.2 农村电网变电站连接方式模型

在确定农村电网变电站连接方式模型时，首先需考虑各级线路供电半径之间的关系。以 110/35/10 kV 变电站与 35/10 kV 变电站的连接为例(图 2)，根据不重复供电原则，110/35/10 kV 变电站的 10 kV 出线所覆盖的供电区域应与下级 35/10 kV 变电站的 10 kV 出线所覆盖的供电区域相互之间不重合，而为了使各 35/10 kV 变电站的供电区域能完整覆盖到 110/35/10 kV 变电站的供电区域，选择令 35/10 kV 变电站的 10 kV 出线与 110/35/10 kV 变电站的 10 kV 出线前后相连。此时 35 kV 线路的长度恰好为 10 kV 线路长度的 2 倍，110/35/10 kV 变电站的供电半径恰好为 35/10 kV 变电站供电半径的 3 倍。因此根据不重复供电原则，假设本文的 3 种配电方式中，上下级供电线路长度之比为 2 : 1，上下级变电站的供电半径为 3 : 1。

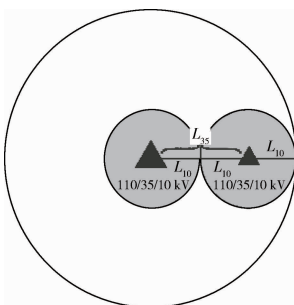


图 2 110/35/10 kV 配电方式各级线路长度关系

Fig. 2 Relationship of line lengths at different levels in 110/35/10 kV distribution mode

在 2 种网架结构中，110/35/10 kV 配电方式相对更加复杂，因为多了一级变压器，也就涉及到了 110/35/10 kV 变压器上连接 35/10 kV 变压器数量的问题^[11-12]。电网模型中变电站连接方式见图 3^[13]；3 个 35/10 kV 变电站均与 1 个 110/35/10 kV 变电站相连，在以 35/10 kV 变电站为中心计算单位供电面积年费用时，就需要考虑到将 110/35 kV 变电站的年费用均摊到几个 35/10 kV 变电站的供电面积中。因此，假设 110/35 kV 变电站数量为 1，该变电站与 n 组 35/10 kV 变电站相连，则计算每组 35/10 kV 变电站供电面积内的单位面积年费用时应加上 110/35 kV 变电站年费用的 $1/n$ 。

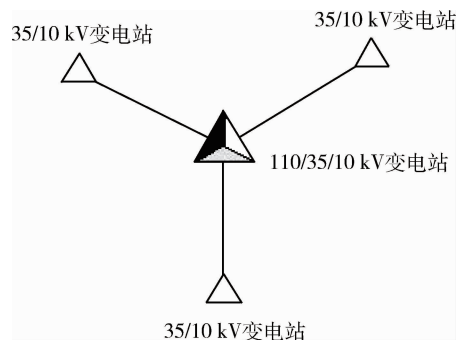


图 3 110/35/10 kV 配电方式变电站连接方式

Fig. 3 Connection diagram of substations in 110/35/10 kV distribution mode

在计算 110/35/10 kV 配电方式的单位供电面积年费用时，应考虑以下几部分的年费用：110/35/

10 kV 变电站、35/10 kV 变电站、10/0.38 kV 变电站、35 kV 线路、10 kV 线路。随着 110/35/10 kV 变电站上所连接的 35/10 kV 变电站数量增加，110/35/10 kV 站的利用率也随之上升，因而 110/35/10 kV 配电方式的经济性也随之提高(单位面积年费用随 35/10 kV 变电站增加而减小)。然而考虑到不同层级的电压网络所覆盖的供电区域都是同一个负荷区域。因此应使各 35/10 kV 变电站供电区域之和尽可能覆盖 110/35/10 kV 变电站的供电区域，同时不因 35/10 kV 变电站数量过多而导致各 35/10 kV 变电站供电区域相互覆盖，造成变电站数量过多，经济性下降的情况。

110/35/10 kV 变电站供电区域为以 35 kV 线路长度 L_{35} 和 10 kV 线路长度 L_{10} 长度总和 ($3L_{10}$) 为半径的圆形区域，总面积为 $9\pi L_{10}^2$ ，除去 110/35/10 kV 变电站自身 10 kV 线路供电面积 πL_{10}^2 后，剩余的环形部分面积为 $8\pi L_{10}^2$ (图 4)。因此可以认为在供电面积足够大且负荷均匀分布的情况下，当 $n=8$ 时 110/35/10 kV 变电站的利用率最高，经济性最好，当 $n<8$ 时，由于各 35/10 kV 变电站供电区域之和并没有完全覆盖 110/35/10 kV 变电站的供电区域，因而经济性稍差；而当 $n>8$ 时，由于各 35/10 kV 变电站的供电区域相互重叠，与不重复供电原则相违背，故经济性较差。因此作出以下假设：110/35/10 kV 变电站上所连接的 35/10 kV 变电站数量 $n \leq 8$ 。

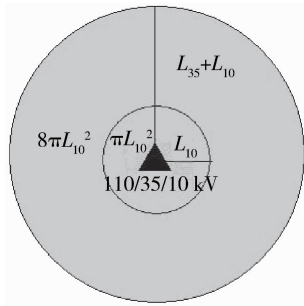


图 4 110/35/10 kV 供电方式供电区域示意图

Fig. 4 Supply area diagram of 110/35/10 kV distribution mode

2 数学模型的构建

2.1 农村电网费用计算的基本参数

1) 电价。综合我国农村各类用电的电价，我国农村电价大致为 0.4~0.5 元/kWh，考虑到在电价

的基础上还要加上农维费以及价外基金，因此取典型情况下的电价 $d=0.5$ 元/kWh^[14]。

2) 年运行小时数、最大负荷利用小时数。年运行小时数 T 。变压器的铁损费是按变压器实际投入电网运行的时间计数的，变压器年运行小时数 T 受许多因素影响，如变压器运行情况、负荷指标等。110 kV 变电站和 35 kV 变电站等变电站年运行小时数相差不大，约为 6 500~7 000 h，取典型情况即 $T=7 000$ h^[15]。

最大负荷利用小时数 T_{max} 。最大负荷利用小时数指 1 年中负荷消费的电能除以 1 年中的最大负荷所得的时间。对于不同行业最大负荷利用小时数不同。一般来说，灌溉用电最大负荷利用小时数为 4 500 h，乡镇企业最大负荷利用小时数为 3 000 h。考虑到经济运行和负荷的发展，取典型情况即最大负荷利用小时数为 4 000 h^[16]。

3) 架空线路的电气参数。

电阻。单位长度导线电阻 $r_0 = \rho \frac{1}{S}$ 。长度为 L 时总电阻为 $R = r_0 L = \rho \frac{L}{S}$ ，式中： ρ 为导线材料的电阻率，对于 LGJ 钢芯铝绞线 $\rho = 31.5 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ； S 为导线截面积， mm^2 ； L 为导线长度， km ^[17]。

电抗。本研究取单位长度的架空线路电抗为 $X_0 = 0.4 \Omega/\text{km}$ ，线路长度为 L 时总电抗为 $X_0 L$ 即 $0.4L$ 。

4) 维护率。在计算电力线路、变电站及其他设施的运行费时，综合有关文献^[18]其维护率的指标可参考表 1。本研究取年运行维护率 $\gamma = 0.04$ 。

表 1 线路、变电站及其他设备维护率

Table 1 Maintenance rate of lines, substations and other equipment

名称	维护率/%
变电站	4.22
配电线路	4.85
补偿装置	5.00
输电线路	≤ 4.00

5) 投资贴现率。投资贴现率是反映目前到将来等待获得收益的机会成本或利息损失的比率。影响贴现计算结果的关键因素是经济使用年限 k 和电力工业投资利率 r_0 ，综合有关文献^[19]：

$$\lambda = \frac{r_0(1+r_0)^k}{r_0(1+r_0)^k - 1} = 0.11$$

6)农村电网中各级变电站、线路年费用。本研究采取将元件属性(如线路截面积、变电站容量等)与费用通过 EXCEL 软件将 2 组变量一次线性化的方法求出各元件的综合投资费并计算年运行费,从而求得总年费用。以下以 110/20 kV 配电方式中 110 kV 线路综合投资费用的计算为例说明求解方法。110 kV 线路截面积与线路投资间的一次线性回归关系见图 5。

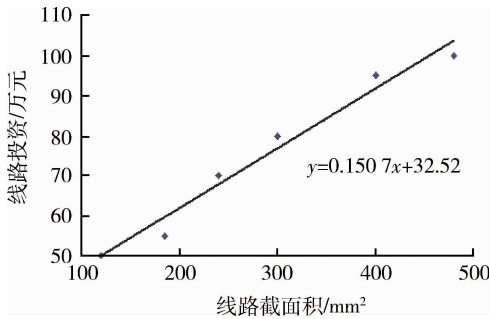


图 5 110 kV 线路截面积与线路投资间的一次线性回归关系

Fig. 5 Linear regression relationship between the line cross-sectional area of 110 kV and investment of lines

线路投资与导线截面积的一次线性回归关系为

$$Z_{110} = (a_{1.110} + a_{2.110}S_{110})L_{110}n_{110} = (32.52 + 0.1507S_{110})2L_{20}n_{110} \quad (1)$$

式中: Z_{110} 为 110 kV 线路投资,万元; $a_{1.110}$ 、 $a_{2.110}$ 分别为 110 kV 线路投资与导线截面积无关、相关的部分的系数; S_{110} 为 110 kV 线路截面积,mm²; L_{110} 为 110 kV 线路供电半径,km。根据 1.2 节假设,上一级电力线路长度通常为下一级电路长度的 2 倍,所以取 110 kV 线路长度 L_{110} 为 20 kV 线路长度 L_{20} 的 2 倍。 n_{110} 为 110/20 kV 变电站所连接的 110 kV 线路出线条数。

2.2 数学模型

通过上述对各配电方式总年费用的分析,得出各种配电方式选择的优化计算数学模型。

110/20 kV 配电方式优化计算数学模型为

$$F = \frac{F_1 + F_{110} + n_{20}(F_2 + F_{20})}{\pi L_{20}^2} \quad (2)$$

式中: F 为该配电方式下的单位面积年费用,万元/km²; L_{20} 为 20 kV 线路供电半径,km; F_1 、 F_2 、 F_{20} 、

F_{110} 为分别为 110/20 kV 变电站、20/0.38 kV 变电站年费用、110/20 kV 变电站连接的 20 kV 线路、110/20 kV 变电站连接的 110 kV 线路的年费用,万元; n_{20} 为 110/20 kV 变电站所连接 20 kV 线路出线条数。

110/10 kV 配电方式优化计算数学模型为

$$F = \frac{F_3 + F_{110} + n_{10}(F_4 + F_{10})}{\pi L_{10}^2} \quad (3)$$

式中: L_{10} 为 10 kV 线路供电半径,km; F_3 、 F_4 、 F_{10} 为分别为 110/10 kV 变电站、10/0.38 kV 变电站年费用、110/10 kV 变电站连接的 10 kV 线路的年费用,万元; n_{10} 为 110/10 kV 变电站所连接 10 kV 线路出线条数。

110/35/10 kV 配电方式优化计算数学模型为

$$F = \frac{1/n(F_5 + F_{110}) + F_6 + F_{35} + F_{10}}{\pi L_{10}^2} \quad (4)$$

式中: F_5 、 F_6 、 F_{35} 分别为 110/35/10 kV 变电站、35/10 kV 变电站年费用、110/35/10 kV 变电站连接的 35 kV 线路的年费用,万元; n 为 10/35/10 kV 站连接 35/10 kV 变电站数量。

计算各配电方式单位面积年费用的约束条件:电压损耗百分比 $\Delta U \leq 5\%$;变电所容载比约束 $S/P \leq 2.0$,式中: S 为变电站容量,kVA; P 为变电站的负荷。

这里仅以 110/20 kV 配电方式为例,将 20 kV 线路各参数代入式(2),化简得到以供电半径 L_{20} 、20 kV 线路导线截面积 S_{20} 、110 kV 线路导线截面积 S_{110} 为优化变量的单位供电面积年费用数学表达式:

$$F = \frac{F_1 + F_{110} + n_{20}(F_2 + F_{20})}{\pi L_{20}^2} = aL_{20}^{-1} + bL_{20}^{-2} + cL_{20}^{-3} + eS_{20}L_{20}^{-1} + fS_{20}^{-1}L_{20}^3 + gS_{110}L_{20}^{-1} + h$$

式中 a 、 b 、 c 、 e 、 f 、 g 、 h 分别为以 L_{20} 、 S_{20} 、 S_{110} 为变量所组成的各项的系数。

$$a = \frac{1}{\pi}(\lambda + \gamma)(a_{1.20}n_{20} + 4a_{1.110})$$

$$b = \frac{1}{\pi}[(\lambda + \gamma)(a_{1.1} + a_{1.2}) +$$

$$dT(a_{3.1} + a_{3.2}) + \frac{dT_{\max}(a_{5.1} + a_{5.2})}{4\cos^2\varphi}]$$

$$c = 2dT_{\max}\pi\sigma^2X_{\Delta P}$$

$$e = \frac{1}{\pi}(\lambda + \gamma) a_{2.20} n_{20}$$

$$f = \frac{8}{15} \frac{T_{\max} \sigma^2 \pi}{n_{20} U_n^2 \cos^2 \varphi} \frac{\rho_{20}}{1\ 000}$$

$$g = \frac{4}{\pi}(\lambda + \gamma) a_{2.110}$$

$$h = \sigma \left[2(\lambda + \gamma) \left(a_{2.1} + \frac{a_{2.2}}{n_{20}} \right) + \right.$$

$$\left. 2dT \left(a_{4.1} + \frac{a_{4.2}}{n_{20}} \right) + \frac{dT_{\max}}{2 \cos^2 \varphi} \left(a_{6.1} + \frac{a_{6.2}}{n_{20}} \right) \right]$$

式中： $a_{1.1}$ 和 $a_{2.1}$ 分别为 110/20 kV 变电站综合造价与变电站容量无关、相关部分的系数； $a_{3.1}$ 和 $a_{4.1}$ 分别为 110/20 kV 变电站空载损耗与变电站容量无关、相关部分的系数； $a_{5.1}$ 和 $a_{6.1}$ 分别为 110/20 kV 变电站负载损耗与变电站容量无关、相关部分的系数； $a_{1.2}$ 和 $a_{2.2}$ 分别为 20/0.38 kV 变电站综合造价与变电站容量无关、相关部分的系数； $a_{3.2}$ 和 $a_{4.2}$ 分别为 20/0.38 kV 变电站空载损耗与变电站容量无关、相关部分的系数； $a_{5.2}$ 和 $a_{6.2}$ 分别为 20/0.38 kV 变电站负载损耗与变电站容量无关、相关部分的系数； $a_{1.20}$ 和 $a_{2.20}$ 为 20 kV 线路综合造价与线路截面无关、相关部分的系数； $a_{1.110}$ 和 $a_{2.110}$ 为 110 kV 线路综合造价与线路截面无关、相关部分的系数； σ 为负荷密度，kW/km²； U_n 为额定电压，kV； $\cos\varphi$ 为功率因数； $X_{\Delta P}$ ；为线路单位长度电抗，Ω/km。

3 求解方法

线路的供电半径及线路的截面积都是影响单位面积年费用的因素；其中供电半径取值范围限制较少，只要使供电范围内的负荷不超过变电站的所能承载的最大负荷即可，而线路的截面积由于工艺、使用的普遍程度等原因只有固定的几种规格。

结合上述限制因素，通过数组迭代的方式来避免出现实际不存在的截面积，而线路截面积也以每次增加 0.1 km 的方式通过循环计算比较求得单位面积年费用最小值^[20-21]。

在计算 110/35/10 kV 配电方式年费用时，需要考虑 110/35 kV 变电站所接 35/10 kV 数量 n ，根据之前假设， $1 \leq n \leq 8$ ，所以同样可以考虑迭代的方法，将 n 与线路供电半径和线路截面积共同作为变量求得单位面积年费用最小值。

通过计算、总结，得出在改变各参数时不同配电方式各自的最小单位年费用，以及其所对应的各参数的取值，所求得的结果见表 2 和表 3。

表 2 110/20 kV 配电方式圆形供电区 20 kV 出线条数对优化结果的影响

Table 2 Influence of 110/20 kV distribution way round supply area 20 kV number of lines on the optimization results

n_{20}	$\sigma/$ (kW/km ²)	$L_{20}/$ km	$X_{20}/$ mm ²	$X_{110}/$ mm ²	$F/$ (万元/km ²)
4	50	9.6	185	240	4.099
	200	6.0	185	240	9.677
6	50	10.6	185	185	3.790
	200	6.7	185	185	8.911

注： n_{20} 为 20 kV 线路出线条数； σ 为负荷密度； L_{20} 为 20 kV 线路供电半径； X_{20} 和 X_{110} 分别为 20 kV 和 110 kV 线路的截面积； F 为单位面积年费用。下表同。

表 3 4 组出线 3 种配电方式下负荷密度对优化结果的影响

Table 3 Optimized results of three distributions under various load densities with four outlets

配电方式	$\sigma/$ (kW/km ²)	$L/$ km	$X_1/$ mm ²	$X_2/$ mm ²	$F/$ (万元/km ²)
110/10 kV	50	5.7	150	185	3.810
	100	4.5	150	185	5.885
	200	3.6	150	185	9.478
	250	3.4	185	185	11.203
	300	3.2	185	185	12.846
110/20 kV	50	9.6	185	240	4.099
	100	7.6	185	240	6.210
	200	6.0	185	240	9.677
	250	5.6	185	240	11.151
	300	5.3	185	300	12.719
110/35/10 kV	50	5.7	95	150	4.268
	100	4.8	95	240	6.479
	200	3.8	95	240	10.796
	250	3.6	95	240	11.931
	300	3.3	150	240	13.546

注： L 为各配电方式中电压等级较低的线路的长度； X_1 、 X_2 分别为各配电方式中电压等级较低、较高线路的截面积；110/35/10 kV 配电方式单位面积年费用按所连接 35/10 kV 变电站数按 8 计算。

4 结 论

对于负荷密度 $\geq 50 \text{ kW/km}^2$ 的农村电网,110/35/10 kV的配电方式单位供电面积年费用较高,经济性较差,考虑到这种配电方式在我国农村电网使用广泛,若对现有配网进行较大规模的改造和重构,还应作更为充分的技术经济分析、比较和评估。对于110/20 kV和110/10 kV 2种配电方式,当负荷密度较小($\leq 250 \text{ kW/km}^2$)时,110/10 kV配电方式的单位供电面积年费用相对较低,而随着负荷密度的增加($\geq 250 \text{ kW/km}^2$),110/20 kV的配电方式则更经济。

参 考 文 献

- [1] 韩娜,许跃进.农村低压电网规划设计应用软件开发[J].中国农业大学学报,2009,14(4):119-123
- [2] 李金芳,刘宗岐,张建华,等.中压配电电压等级选择研究[J].现代电力,2009,26(4):51-55
- [3] 冯晶.农网建设与改造配电线路的设计[J].轻工设计,2011(3):90
- [4] 刘沛清,滕欢.20 kV电压等级在我国电网发展中的应用及展望[J].电工电气,2011(8):1-4
- [5] 汤红卫,郭喜庆.基于地理信息系统的农村电网规划[J].中国农业大学学报,2001,6(2):68-72
- [6] 顾雨嘉,许跃进,倪文峰,等.农村电网各电压级配电设施合理规模比例的探讨[J].农业技术与装备,2011(12):13-15
- [7] 邓建新.农村电网建设和改造配电线路的设计[J].中国电子商务,2010(12):73-73
- [8] 樊丽娜,许跃进.农村中压配电网电压等级的优化选择[J].电力系统保护与控制,2009,37(11):102-105
- [9] 张雯雯,李松.农村配电网的运行方式分析[J].科学与财富,2010(10):229-230
- [10] 张宁,任玲.农村配电网网架结构规划方法研究[J].农业网络信息,2011(6):102-104
- [11] 丁文彦,吴修世,王俊,等.农村电网10 kV电压升为20 kV改造方案的探讨[C]//中国电机工程学会.2008年20 kV电压供电专题研讨会论文集.苏州:中国电机工程学会,2008:188-191
- [12] 陈春燕,许跃进,尚可,等.农村电网最优电压组合方案的研究[J].沈阳农业大学学报,2005,36(6):709-712
- [13] 常松,许跃进.计及联络线方式的配电网规划方法[J].中国农业大学学报,2005,10(5):81-84
- [14] 闫大伟.新农村电网规划的思考及建议[J].中国科技信息,2010(15):91-92
- [15] 朴在林,杨涛,南俊星,等.农村电网改造中若干技术经济问题的研究[J].农业工程学报,2001,17(2):119-122
- [16] 黄芷定,邹玲玲.如何解决农村配电网低电压问题的探讨[J].中国西部科技,2010,9(24):62-63
- [17] 王京,刘宝贵.连山区农电局配电网自动化方案的可行性研究[J].沈阳工程学院学报:自然科学版,2006,2(2):140-143
- [18] 苏卫华,施伟国.基于变电站分布模型的电压等级优化配置[J].电力系统及其自动化学报,2010,22(3):96-101
- [19] 柳占杰,许跃进.基于电压制式的电网最优供电半径研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(19):87-91,101
- [20] 李敏.20 kV线路经济供电半径的研究[C]//中国电机工程学会.中国电机工程学会高电压专业委员会2009年学术年会论文集.武汉:中国电机工程学会,2009:1680-1685
- [21] 时金媛,许跃进.农村低压配电网经济供电半径计算方法研究[C]//长沙理工大学,中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十五届学术年会论文集.长沙:长沙理工大学,2009:1-3

责任编辑:刘迎春