

# 对我国农村配电网最佳电压的研讨

原 河 峰

(电机系)

## 提 要

我国现行的电力网配电电压是沿用苏联五十年代的电压等级, (10、6、3、0.38/0.22千伏), 但随着我国农业的发展, 目前已经出现了电能损耗大, 末端电压低等缺点。

本文从我国现行电气设备价格等方面, 以35、20、10千伏作为配电电压, 进行综合性分析, 最后认为:

(1) 供电距离在10千米左右, 负荷密度每平方公里在15千伏安以下地区, 10千伏供电比较经济; (2) 供电距离在10—30千米, 每平方公里负荷密度在90千伏安以下, 以20千伏供电最佳; (3) 供电距离在40千米以上的各种负荷密度情况下, 以35千伏供电最为合适。

因此, 本文认为在我国现有电压等级中应增加20千伏电压等级。

我国现行的电力网配电电压, 是沿用于苏联50年代电力网的电压等级(220、110、(60) 35、10、6、3、0.38/0.22千伏), 但随着我国工农业的发展, 目前已经出现了电能损耗大, 末端电压低等缺点。按照目前我国电力规划到2000年发电和用电都要翻两番, 而这些电力都要通过配电网送到工厂、机关、学校和农村, 现有的以10千伏为主的配电网电压能否满足需要, 确是值得讨论的问题。

配电网的最佳电压, 它取决于变电站分布的稀疏、负荷密度、送电距离以及配电点的稠密等因素是一个多元的复杂函数。为了简化计算, 我们假定负荷是均分布在每一个平方公里

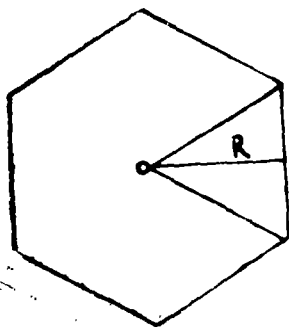


图 1

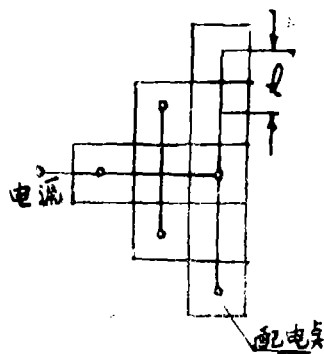


图 2

上, 每一个变电所以六条出线向六个不同方向供电, 其供电模型为一六角形, 如图1所示, 其供电半径为 $R$ , 供电面积为 $2\sqrt{3}R^2$ , 而每一个小三角形, 由一条配电线路来供电, 其供电面积为 $R^2/\sqrt{3}$ 。由于负荷的均匀分布, 在每一小三角形中还有许多支线。为了计算简便, 其供电模型如图2所示, 图中支线导线截面认为是相同的, 而干线 $R$ 的导线截面是比较

大的。为了求取支线长度，我们作如下的标记：

$l$ ——两配电点之间距离（公里）；

$A$ ——小三角形面积（平方公里）；

$R$ ——干线总长度（供电半径）（公里）；

$N$ ——连接的配电点数目；

$$N = \frac{AS_0}{S_T}$$

$S_0$ ——供电地区的负荷密度（千伏安/平方公里）；

$S_T$ ——配电点的单台容量（千伏安）；

$$f = \frac{A}{N} \text{——单个配电点供电面积（平方公里）。}$$

很明显在采用上述模型后，其线路总长度为：

$$L_0 = \sum l = \sum \sqrt{f} = N\sqrt{f} = \sqrt{NA}$$

所以支线总长度为：

$$L_z = L_0 - R \quad (1)$$

下面我们先由线路和配电变压器的现行价格，对农村配电网的最佳电压进行分析，线路单位长度的投资可用下式表示为：

$$Z'_l = a_l + b_l U^{\alpha_l} + c_l F' \quad (2)$$

式中： $U$ ——线路额定电压（千伏）；

$F'$ ——线路导线截面（平方毫米）；

$a_l$ 、 $b_l$ 、 $c_l$ ——线路有关常数；

$\alpha_l$ ——线路投资与电压有关系数。

线路单位面积的投资：

$$\begin{aligned} Z_l &= \left\{ \left[ a_l + b_l U^{\alpha_l} + c_l \frac{S_0 R^2}{3U_j} \right] R + L_z Z'_z \right\} \div R^2 \sqrt{3} \\ &= \sqrt{3} \frac{a_l}{R} + \sqrt{3} \frac{b_l U^{\alpha_l}}{R} + c_l \frac{S_0 R}{\sqrt{3} U} + L_z Z'_z \frac{\sqrt{3}}{R^2} \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $Z'_z$ ——为支线单位长度投资（万元/公里），考虑35千伏支线截面小于20千伏支线，而20千伏支线截面小于10千伏支线。但各种电压下支线长度又均相等，所以在三种电压下，支线总投资相差不大。因此，我们可近似认为，支线投资与电压无关。

$j=1$ ——经济电流密度（安/平方毫米）

单个配电点投资可用下式表示：

$$Z'_T = a_T + b_T U^{\alpha_T} + c_T S_T \quad (4)$$

式中 $a_T$ 、 $b_T$ 、 $c_T$ ——单个配电点有关常数；

$\alpha_T$ ——配电变压器投资与电压有关系数。

单位面积配电点的投资为：

$$Z_T = [Na_T + Nb_T U + Nc_T S_T] \div R^2 / \sqrt{3} = \sqrt{3} \frac{Na_T}{R^2} + \sqrt{3} \frac{Nb_T U}{R^2} + \sqrt{3} c_T \frac{NS_T}{R^2} \quad (5)$$

从式(3)和式(5)中,在给定变电所中心位置和 $\alpha_1 = \alpha_T = 1$ 的情况下,配电网投资与电压有关部分可用下式表示:

$$Zu' = \sqrt{3} \frac{b_T NU}{R^2} + \sqrt{3} \frac{b_l}{R} U + \frac{c_l R}{\sqrt{3} U} S_0 \quad (6)$$

线路和配电点a、b、c系数,根据我国现有设备元件的造价,按 $\alpha_T = \alpha_l = 1$ 取其平均值,并统计列表如下:

表1 配电线路a<sub>l</sub>、b<sub>l</sub>、c<sub>l</sub>系数表

电压(千伏)	a <sub>l</sub> (万元/公里)	b <sub>l</sub> (万元/千伏)	c <sub>l</sub> (万元/毫米 <sup>2</sup> )
10	$387 \times 10^{-3}$	$38.7 \times 10^{-3}$	$9.96 \times 10^{-3}$
20	$406 \times 10^{-3}$	$20.34 \times 10^{-3}$	$10.375 \times 10^{-3}$
35	$511.2 \times 10^{-3}$	$14.057 \times 10^{-3}$	$12.37 \times 10^{-3}$

表2 配电点a<sub>T</sub>、b<sub>T</sub>、c<sub>T</sub>系数表

电压(千伏)	a <sub>T</sub> (万元/台)	b <sub>T</sub> (万元/千伏)	c <sub>T</sub> (万元/千伏安)
3—10	$65.6 \times 10^{-3}$	0	$7.15 \times 10^{-3}$
20	$130 \times 10^{-3}$	$10.53 \times 10^{-3}$	$6.59 \times 10^{-3}$
35	$210 \times 10^{-3}$	$20.3 \times 10^{-3}$	$4.31 \times 10^{-3}$

与电压有关部分的年运行费用为:

$$F_t = Zu' p\% + \Delta p \beta \tau \quad (7)$$

配电网单位面积功率损耗为:

$$\Delta p = 3I^2 r \times 10^{-3} = 3 \left[ \frac{R^2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{S_0}{3} U} \right]^2 \cdot \left( \frac{p}{F} \right) \cdot \left( \frac{R}{3} \right) \times 10^{-3}$$

$$\frac{R^2}{\sqrt{3}} = k' \frac{S_0^2}{U^2} R^3 \times 10^{-3} \text{ 瓩}$$

式中  $p\%$ ——配电网维护,检修费用,取7%;

$\beta$ ——电价取0.05元/度;

$\tau$ ——配电网最大损耗时间,取2000小时;

$K'$ ——常数;

$\rho$ ——导线电阻率(欧姆·千米/毫米<sup>2</sup>)

考虑到国民经济发展较快,投资效益按静态不能反映它的真正效果,故各项计算均考虑年复利,按照《能源经济学及电力系统规划》一书最小计算费用法推导:

$$NF = Zu' \left[ \frac{\gamma_0 (1 + \gamma_0)^n}{(1 + \gamma_0)^{n-1}} \right] + F$$

式中:  $Z'u$ ——折算到第 $m$ 年的总投资;

$$Z'u = \sum_{t=1}^{t=m} Z_t (1 + r_0)^{m-t}$$

若 $m=1$ (即认为是一次性投资)则 $Z'u = Z_t$ ;

$$\left[ \frac{\gamma_0 (1 + \gamma_0)^n}{(1 + \gamma_0)^{n-1}} \right] \text{——资本回收系数为} 0.11;$$

(取输变电工程经济使用年限 $n=25$ 年,利率 $\gamma_0=10\%$ )。

$F$ ——折算年运行费用;

$$F = \frac{\gamma_0 (1 + \gamma_0)^n}{(1 + \gamma_0)^n - 1} \left[ \sum_{t=1}^{t=n} F_t \frac{1}{(1 + \gamma_0)^t} \right] = 1.1 F_t \cdot 1$$

(取 $m=1$ ,  $n=25$ 年,  $\gamma_0=10\%$ )

则单位面积年计算费用

$$NF' = 0.11 Z'u + 1.1 F_t \text{ (万元/单位面积)} \quad (8)$$

计算结果如曲线1所示。(见下页图)

由计算曲线可见:

1、负荷密度在每平方公里为15千伏安以内,供电半径在10公里左右,配电网用10千伏供电是比较经济的,即使在其他负荷密度情况下,以10千伏供电还是20千伏供电,年费用相差不多。

2、负荷密度在每平方公里90千伏安以下,供电半径在10—30公里之间,以20千伏供电最为经济。

3、当供电距离在40公里以外的各种负荷密度情况下,都以35千伏作为配电电压最为适宜。

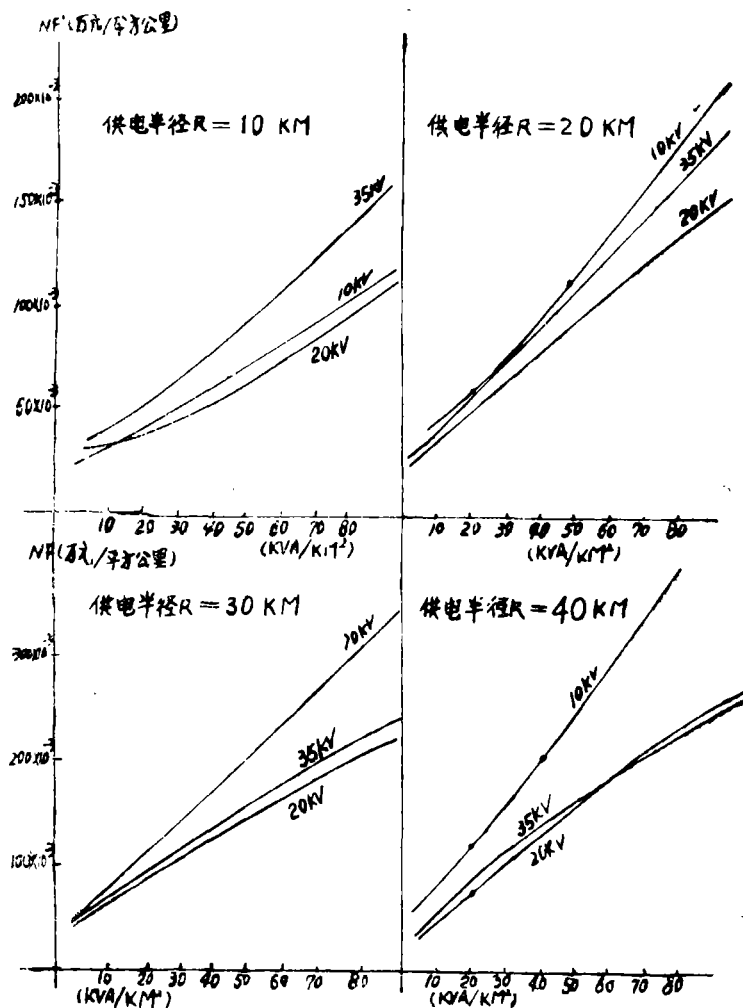
另外,我们还可从理论上对最佳电压进一步论证:

由(8)式  $NF' = 0.11 Zu' + 1.1 F_t$

$$= (0.383 \frac{b_T N}{R^2} + 0.421 \frac{b_l}{R}) U + C/U = AU + C/U \quad (9)$$

式中  $A = 0.383 \frac{b_T N}{R^2} + 0.421 \frac{b_l}{R}$  ——与供电半径有关系数;

$C = 0.62 \beta \tau \rho R \times 10^{-3}$  ——与供电半径有关系数。



曲线1 年费用与负荷密度关系曲线

式(9)表示单位面积年费用与配电电压的函数关系, 对电压 $U$ 求微分, 并使微商为零,

可得最佳电压为: 
$$U_0 = \sqrt{\frac{C}{A}} \quad (10)$$

此最佳电压 $U_0$ 并不等于国家规定的标准电压, 而是介于某个标准电压 $U_i$ 、 $U_{i+1}$ 之间年费用最小的一个电压值, 它是供电半径 $R$ 的函数, 不同的 $R$ 值, 对应有不同的 $U_0$ 值, 而不同 $U_0$ 值, 又决定了不同的年费用 $NF'$ 值。因此, 在标准电压 $U_i$ 、 $U_{i+1}$ 之间存在一个经济带。我们利用(9)式可以获得经济带边界的解析方程式, 在某一供电半径 $R$ 时, 临近两个标准电压 $U_i$ 、 $U_{i+1}$ 在各方案的花费均衡的情况下是等经济的, 这些方案的电压与最佳电压 $U_0$ 之间关系, 由(9)式可写为:

$$AU_i + C/U_i = AU_{i+1} + C/U_{i+1} \quad (11)$$

$$\text{或} \sqrt{U_i U_{i+1}} = \sqrt{C/A}$$

比较(10)、(11)式可得:

$$U_0 = \sqrt{U_i \cdot U_{i+1}}$$

当 $U_i = 10$ 千伏、 $U_{i+1} = 35$ 千伏,  $U_0 = 18.7$ 千伏, 即从理论上来看, 在10千伏与35千伏配电电压之间需加一级电压时, 最佳电压值接近20千伏。因此, 从各种情况分析, 我们有理由认为增加一级20千伏配电电压是合理的。

综合上述, 笔者认为随着我国农业电气化到2000年实现农村人均用电200度的要求, 仍以目前10千伏作为主要配电电压是很难实现上述目标的, 如河南某县面积为2007平方公里, 目前已有两座110千伏变电所, 15座35千伏变电所。如到2000年实现工农业翻两番的要求, 而配电电压仍用10千伏供电, 那真不知道如何布置变电所才是最合理的。由于我国农村电气化的起步较晚, 河南某县情况是个别的, 全国农村能达到该县用电水平的并不多, 而广大农村还是处于电气化的低级阶段, 负荷密度还很小, 我们曾对某省115个县(郊区)进行了统计, 30仟瓦/公里<sup>2</sup>以上的县(郊区)有10个, 20仟瓦/公里<sup>2</sup>以上的县(郊区)有26个、15仟瓦/公里<sup>2</sup>以上的县(郊区)有14个、10仟瓦/公里<sup>2</sup>以上的县(郊区)有26个、5仟瓦/公里<sup>2</sup>以上的县(郊区)有36个、5仟瓦/公里<sup>2</sup>以下的县(郊区)有12个。它们尚有40%左右的农户还没有电灯, 更谈不上电气化。

目前我国尚有一部分同志认为部分农业地区已实现了110/35/10千伏供电, 改为110/20千伏供电已经太晚了。这种说法根据是不足的, 事实上, 正是那些高度集中用电的农业地区, 随着工农业负荷的迅速增长, 更急需采用20千伏作为配电电压, 因为只有提高配电网电压才是增加输送能力的最经济办法。仍以河南某县为例, 到2000年负荷翻两番, 若配电电压仍采用10千伏供电, 仅电能损失一项将会达到不能容忍的程度, 这笔帐是值得电力工作者认真计算一下的(见另文“关于10千伏电网改造为20千伏电网的框算”)。

现在西方一些国家, 如法国、意大利和苏联一些加盟共和国, 在60年代初期不仅把农村电网电压, 而且也把城市电网电压逐步由10、15千伏升压为20千伏, 取得了良好的效果, 而我国农业电气化除少数地区外, 都还处于起飞阶段, 配电电压选择的合适与否, 会影响我国今后几十年农村电网的经济效益, 这个问题已经摆在我们面前, 想回避也是不可能的, 拖的时间越长造成的损失越大, 现在是电业各级领导部门应当考虑这个问题的时候了, 否则为时真是太晚了, 其后果也是很严重的。

#### 附 录

\*1 电网折算年运行费用公式。

这里我们不考虑分期投资, 认为一次投产。

第一年运行费用为 $F_1$ , 而折算到第 $n$ 年,  $F_1' = F_1(1 + \gamma_0)^{n-1}$

第二年运行费用为 $F_2$ , 而折算到第 $n$ 年,  $F_2' = F_2(1 + \gamma_0)^{n-2}$

.....

第 $n$ 年运行费用为 $F_n$ 折算到第 $n$ 年,  $F_n' = F_n(1 + \gamma_0)^{n-n}$

折算到第 $n$ 年的运行费用:

$$F_n = \sum_{t=1}^{t=n} F_t (1 + \gamma_0)^{n-t}$$

$$\text{则有: } \sum_{t=1}^{t=n} F_t (1+\gamma_0)^{n-t} = F_1 (1+\gamma_0)^{n-1} + F_2 (1+\gamma_0)^{n-2} + \dots + F_n$$

若设在 $n$ 年内平均运行费为 $F$ , (而 $F = F_1 = F_2 \dots = F_n$ )

则上式可化为:

$$\begin{aligned} F &= \frac{\sum_{t=1}^{t=n} F_t (1+\gamma_0)^{n-t}}{(1+\gamma_0)^{n-1} + (1+\gamma_0)^{n-2} + \dots + 1} \\ &= \frac{\gamma_0 (1+\gamma_0)^n \sum_{t=1}^{t=n} F_t \frac{1}{(1+\gamma_0)^t}}{(1+\gamma_0-1) [(1+\gamma_0)^{n-1} + (1+\gamma_0)^{n-2} + \dots + 1]} \\ &= \frac{\gamma_0 (1+\gamma_0)^n}{(1+\gamma_0)^n - 1} \left[ \sum_{t=1}^{t=n} F_t \frac{1}{(1+\gamma_0)^t} \right] \end{aligned}$$

若在设备经济使用期25年内, 平均利率 $\gamma_0 = 10\%$ , 其各年运行费用都相等的情况下, 利用公式:

$$a + a^2 + a^3 + \dots + a^n = \frac{1-a^n}{1-a};$$

$$\begin{aligned} \text{得: } F &= F_t \cdot \frac{\gamma_0 (1+\gamma_0)^n}{(1+\gamma_0)^n - 1} \left[ \frac{1 - \frac{1}{(1+\gamma_0)^n}}{1 - \frac{1}{(1+\gamma_0)}} \right] \\ &= F_t \cdot \frac{0.1 (1+0.1)^{25} \times [1 - \frac{1}{(1+0.1)^{25}}]}{[(1+0.1)^{25} - 1] [1 - \frac{1}{1+0.1}]} \\ &= 1.1 F_t \end{aligned}$$

\*2为了简化计算, 本文在各种电压情况下, 对小三角形中配电网干线取同一导线截面, 其长度按 $R$ 计算, 投资略有扩大, 并不影响结论。

### 参 考 文 献

- [1] Параметры Воздушных Электрических Сетей, Рига 1960
- [2] Шеналь Р.В. Картвцев В.В. Оптимизация Основных Параметров Электропередачи
- [3] 陈衍 电力系统稳态分析 (南京工学院)