

文章编号 :1671 - 6833( 2002 )03 - 0070 - 05

灵敏度指标在 10 kV 配电线路无功补偿中的应用

王克文<sup>1</sup>, 姜俊峰<sup>2</sup>, 刘宪林<sup>1</sup>, 李小磊<sup>1</sup>

( 1. 郑州大学电气工程学院 河南 郑州 450002 ; 2. 驻马店电力设计所 河南 驻马店 463000 )

摘 要 : 针对电力系统 10 kV 配电线路的具体特点 , 采用灵敏度分析技术进行无功补偿计算 . 从实际应用角度 , 描述了优化问题的构成、电能损耗和电压分布的计算 , 以及对负荷形状系数的处理 . 详细介绍了灵敏度系数的计算、应用和无功补偿最终方案的确定 . 在对几十条实际 10 kV 线路计算的基础上进行了说明、分析和讨论 . 利用经济性目标函数对节点无功注入的灵敏度 , 对各可选点的补偿效果进行预估和排序 , 然后仅对有限的方案进行准确试算 . 在计及电容器实际容量、组别的基础上完成 10 kV 配电线路电容器定位及最佳补偿量的确定 .

关键词 : 配电线路 ; 灵敏度 ; 无功补偿 ; 并联电容器

中图分类号 : TM 761.1 ; TM 726.3      文献标识码 : A

作为改善电压质量和降低网损的有效手段之一 , 并联电容补偿已广泛应用于电力系统的不同电压等级 . 就 10 kV 线路而言 , 无功补偿可分散或集中安装 . 后者易于维护 , 前者则补偿效果更好 . 两者的合理组合使用 , 理论上可达到最为理想的补偿度 .

在无功补偿设备选址和最佳补偿量的确定方面 , 多年来已有大量的文献发表<sup>[1~6]</sup> , 其中不少已有效地应用于生产实际 . 通常构成的经济性目标函数是网损降低的经济收益与设备的等效成本之间差额的最大化<sup>[2,3]</sup> . 约束条件则是不同运行方式下的电压约束、支路约束及无功约束等 . 由于采用的数值求解方法不同 , 计及的约束条件也不尽一致 . 将各点补偿容量近似作为连续变量的处理方法 , 可利用成熟的数学规划方法 , 得到理论上的最优解 , 诸如各种基于连续变量的规划方法<sup>[3,6]</sup>和由此衍生的灵敏度法<sup>[4]</sup> . 为考虑更多的实际因素 , 启发式方法也有所应用<sup>[2,5]</sup> . 值得一提的是 , 不论何种算法 , 都需人工干预才能最终确定实际安装地点、容量及标准化产品 .

本文在枚举试算法的基础上 , 按灵敏度指标先对各可安装地点的补偿效果进行预估和排序 , 然后对效果最优的前几个方案进行准确计算 , 最后通过人机交互方式确定最终方案 . 所提方法已

成功应用于 10 kV 线路无功补偿的确定 .

1 线路无功补偿与灵敏度系数

1.1 优化问题

为达到最优补偿的目的 , 以年综合经济效益为优化目标 . 对单个的 10 kV 配电线路 , 有

$$\text{Max } F = (\Delta A_d - Q_{C\Sigma} \mu T) \beta - (C_0 + C_1 Q_{C\Sigma}) \gamma, \tag{1}$$

式中  $\Delta A_d$  为年电能损耗减少量 ;  $Q_{C\Sigma}$  为该线路总无功补偿量 ;  $T$  为运行时间 ;  $\mu$  为电容器介质损失角 ;  $\beta$  为单位电能价格 ;  $C_0, C_1$  分别为电容器组的固定投资系数和与容量相关的投资系数 ;  $\gamma$  为折旧、维护及工业效益综合系数 . 根据本文所用实际系统的具体情况 , 各系数取值分别为 :  $\mu = 0.003 \text{ kW} \cdot \text{h} / (\text{kV} \cdot \text{A})$  ,  $\beta = 0.385 \text{ 元} / (\text{kW} \cdot \text{h})$  ,  $C_0 = 200 \text{ 元}$  ,  $C_1 = 29 \text{ 元} / (\text{kV} \cdot \text{A})$  ,  $\gamma = 0.20$  .

所考虑的约束条件包括两类 . 第一类为常规约束 , 可直接计入计算程序之中 , 包括 : 电源点、负荷点及中间节点的功率平衡约束 ; 节点电压约束 ; 支路功率约束 ; 功率因数上限约束 ; 局部无功倒流约束 ; 可安装地点约束 ; 现有无功配置等 . 第二类约束主要用于人机交互时使用 , 包括标准化产品的选择和不同负荷水平下无功补偿配置的协调等 .

收稿日期 2002 - 05 - 16 ; 修订日期 2002 - 07 - 10  
基金项目 国家自然科学基金资助项目 ( 50177028 )  
作者简介 王克文 ( 1964 - ) , 男 , 山西省平陆县人 , 郑州大学副教授 , 博士 , 主要从事电力系统分析与控制方面的研究 .

1.2 电能损耗及电压分布计算

10 kV 配电线路电能损耗  $\Delta A$  包括线路和变压器中的可变损耗  $\Delta A_{Cu}$ 、变压器铁损  $\Delta A_{Fe}$  及电容器介质损耗  $\Delta A_C^{[7]}$ , 即

$$\Delta A = \Delta A_{Cu} + \Delta A_{Fe} + \Delta A_C \tag{2}$$

其中, 后两项与负荷大小关系不大, 对  $\Delta A_{Cu}$  的计算已有几类定型的成熟算法, 本文中仅考虑其中两种.

第一种为离线计算. 考虑到实际应用中的方便性, 将线路首端的总电量按配电变压器容量近似分配到各负荷点, 并计及现有无功配置及专线用户电量的影响, 即

$$A_{Pi} = (A_{P\Sigma} - A_{PS\Sigma}) \cdot \frac{S_{Ni}}{S_{N\Sigma}} + A_{PSi}; \tag{3}$$

$$A_{Qi} = (A_{Q\Sigma} + A_{QCO\Sigma} - A_{Q\Sigma}) \cdot \frac{S_{Ni}}{S_{N\Sigma}} - A_{QCOi} + A_{QSi}. \tag{4}$$

式中:  $A$  表示电量;  $S_N$  表示配电变压器容量; 下标  $P, Q$  分别表示有功和无功; 下标  $C0$  对应于已有电容补偿量; 下标  $S$  表示专用;  $i, \Sigma$  分别表示第  $i$  个节点量和总量. 专线用户按电量接在相应节点. 依据式 (3) (4) 的电量分配方法是带来损耗计算误差的第一个因素.

然后, 将各负荷点电量转化为平均功率,

$$\bar{P}_i + j\bar{Q}_i = (A_{Pi} + jA_{Qi})/T. \tag{5}$$

在不计损耗影响的前提下, 由线路末端向电源点依次确定各配电变压器及线路中的功率. 也可直接按电量处理, 再由电源点向线路末端依次计算功率损耗、电能损耗及各节点电压. 利用图论中的节点处理方法, 可达到快速计算的效果.

带来电能损耗计算误差的第二个因素是年负荷曲线形状系数的影响, 即式 (6) 中的  $K$ .

$$\Delta A_{Cu} = TK \sum \Delta \bar{P}_j, \tag{6}$$

其中:  $\Delta \bar{P}_j$  对应于第  $j$  个线路/变压器中的平均可变有功损耗. 在本文所处理的豫中 41 条 10 kV 线路中, 分类统计典型线路的按小时计月电流曲线、按日计月电量曲线及按月计年电量曲线. 回归分析各类线路的年负荷曲线形状系数发现, 城区线路的  $K$  值较大, 郊区线路的  $K$  值较小; 重负荷线路的  $K$  值较大. 而且, 在这些线路中,  $K$  值与电量有较强的相关性. 因此, 本文中依据线路类型及电量确定  $K$  的取值.

尽管有如上所述的两个误差因素, 但对最终无功补偿方案的确定并无明显的影响.

第二种方法用于在线计算, 即利用已有配

电化数据采集系统所提供的信息, 直接得到 10 kV 线路上各负荷点在一段时间内的用电量. 形状系数可由在线运行曲线记录准确确定, 从而提高计算精度. 尽管已完成该功能的软件设计, 但尚未使用.

1.3 灵敏度系数

假设在当前线路运行状态下, 要在第  $j$  段线路末端配置容量为  $Q_{Cj}$  的 10 kV 电容器组, 则在目标函数式 (1) 中, 受影响量有  $Q_{C\Sigma}$  和  $\Delta A_d$ .  $Q_{C\Sigma}$  为各点  $Q_C$  的代数和.  $\Delta A_d$  可表达为

$$\begin{aligned} \Delta A_d &= TK \sum_{k \in S_j} R_k \left[ \frac{\bar{P}_k^2 + \bar{Q}_k^2}{U^2} - \frac{\bar{P}_k^2 + (\bar{Q}_k - Q_{Cj})^2}{U^2} \right] \\ &= \frac{TK}{U^2} \sum_{k \in S_j} R_k (2\bar{Q}_k Q_{Cj} - Q_{Cj}^2). \end{aligned} \tag{7}$$

式中:  $S_j$  为从电源点到  $j$  点的线路集合;  $\bar{P}_k + j\bar{Q}_k$  为流过第  $k$  段线路的平均功率;  $R_k$  为第  $k$  段线路的电阻. 10 kV 配电线路计算中, 电压  $U$  可近似取额定电压以便简化计算.

计及式 (7) 后, 式 (1) 中的目标函数在  $Q_{Cj} = 0$  处对  $Q_{Cj}$  的灵敏度可表达为

$$\frac{\partial F}{\partial Q_{Cj}} = \left( \frac{2TK}{U^2} \right) \sum_{k \in S_j} R_k (\bar{Q}_k - Q_{Cj}) - \mu T \beta - C_{1\gamma}, \tag{8}$$

即 
$$\frac{\partial F}{\partial Q_{Cj}} = \frac{2K\beta}{U^2} \sum_{k \in S_j} R_k \cdot A_{Qk} - \mu \cdot T\beta - C_{1\gamma}. \tag{9}$$

式中:  $A_{Qk}$  为流过第  $k$  段线路的无功电量. 当式 (9) 值为正时, 说明  $Q_{Cj}$  应取正值, 即增加  $j$  点电容量; 反之, 应减少该点已有的无功配置.

式 (9) 也可理解为在现有无功配置条件下, 对  $j$  点无功注入的灵敏度, 即由式 (1) 对  $Q_i$  直接求得得到.

对式 (9) 的计算需要两个过程, 即由线路末端向电源点计算各支路电量, 以及从电源点向末端依次计算各点的灵敏度值. 使用式 (9) 的最大方便之处是可以一次计算所有点的灵敏度值, 计算量相当于一次电能损耗计算.

2 应用实例

2.1 单点补偿量  $Q_{per}$  的确定

实际工程中, 电容器组容量的分布范围较宽. 在一个补偿点上可能用一组电容器, 也可能是两组或三组. 本文中, 按单组容量从小到大排列, 然后是两组的组合、三组的组合, 从而构成不连续的从小到大排列的单点可选补偿量. 因为所处理的对象为小型城市的 10 kV 线路, 所以每条线路的 10 kV 无功补偿点数不超过 3 个. 按照一条线路所

需的总补偿量选择补偿点数和单点补偿量  $Q_{\text{per}}$ 。由于单点可选补偿量分布的不连续,程序中初选的依据是使补偿量和所需量尽量接近。

## 2.2 灵敏度系数中的应用

计算出所有点的灵敏度值后,按绝对值大小进行排序,正值为增加补偿量,负值则减少已配补偿。

按所排次序逐个方案准确计算。即在相应点上依灵敏度的正负号增设一选定的单点补偿量  $Q_{\text{per}}$  或去掉一组已有的电容器组,计算式(1)的目标函数值、功率越限支路的个数,以及正常(对应于平均功率)、最大、最小三种运行方式下线路中的最高电压和最低电压点的电压值。在处理最大、最小方式时将该方式下线路首端功率记录  $P_{\text{max}}$ ,  $P_{\text{min}}$  转换为电量,用类似于正常方式下电压计算的方法处理。由于现场提供的  $P_{\text{max}}$ ,  $P_{\text{min}}$  可能不太准确,使用时按平均月电量对应的功率进行简单的判断,即应满足  $P_{\text{max}} < \bar{P} < P_{\text{min}}$ , 且数值上合理。

实际计算表明,一般情况下,准确计算前 5 个方案已足够。在满足约束的前提下,选择经济性最优的方案并增/减相应点的补偿量。然后,重新计算各点灵敏度,重复上述过程直到结束。

对有些负荷稍轻的线路,可能无解,即得不到补偿点,此时,将单点补偿量  $Q_{\text{per}}$  的值降低一个等级重新进行。

有时,在得到一或两个补偿点后,得不到下一个补偿点,此时也将  $Q_{\text{per}}$  降一级试算。

在逐个方案计算时,由于设定了补偿后的功率因数上限,包括轻负荷运行方式,所以不可能出现整个线路的无功倒流现象。但一条 10 kV 线路内部的局部无功倒流有时是在所难免,尤其在具有较多分枝时。设第  $j$  段线路末端的欲补偿量  $Q_{\text{per}}$  与补偿前流过该线路无功功率  $Q_j$  的比值为

$$M = Q_{\text{per}}/Q_j, \quad (10)$$

则作为约束条件的  $M$  的取值直接影响计算结果。本文中,初始计算时取  $M = 1.5$ , 当  $Q_{\text{per}}$  降一级时取  $M = 2.5$ 。即在改善经济性的前提下适当允许局部的无功倒流。

对有些轻负荷线路而言,无功补偿的经济性为负。这时由用户决定是否需要补偿无功以提高功率因数。

## 2.3 最终方案的确定

上述方法仅提供一有效的辅助计算结果,其

它难以准确计入的因素需人机交互最终确定。包括不易过多的产品型号、不同负荷发展水平下无功补偿配置的协调、详细安装地点的确定等。

因此,相应的软件包括三部分。第一部分 PROG1 为前述计算。第二部分 PROG2 不考虑现有并联电容器的退出,在因电容器退出、加入而产生振荡时使用,电容器退出问题留待第三部分解决。第三部分 PROG3 用于人机交互,即仅计算设定补偿配置下的目标函数值、约束条件满足情况和各点灵敏度指标,为人工调整提供数据。

在由 PROG1 所提供的结果中,有些电容器安装地点相当靠近。因此,人机交互的另一任务是考查一条线路上相邻安装地点合并的可能性。

至于其它辅助设备的配置,如避雷器、跌落式熔断器、引下线等,按相应工程规范处理。

## 2.4 实现

所述算法的计算部分用 Fortran 语言完成。依据辐射性 10 kV 配电线路的实际特点,利用图论中的处理方法实现节点之间的关联及节点一支路关联,提高计算速度。依使用者需要可设定为一次处理一条线路或多条线路。由于多条线路的处理等同于单线路的重复,对线路规模(节点数)及总线路数目不加限制。最终输出多条线路的汇总结果。

界面部分用 Delphi 实现,以提供尽可能方便的图形/数据输入、输出方式。

## 3 算例

该方法已应用于河南省某市的 41 条 10 kV 配电线路的无功补偿计算。如 2.3 节所述,对所有线路逐条按 PROG1 计算,若出现增、退电容振荡,改用 PROG2 进行,根据 PROG1, PROG2 计算的结果,确定所需的几种电容器产品,最后用人机交互方式的 PROG3 确定最终方案。

在所处理的 41 条线路中,初算表明,有 24 条线路在装设无功配置后经济性改善。下面以白东线为例作些说明。

该线路共有 66 段、44 个 10 kV 配电变压器,在 8 个负荷点上现有 19 组 380 V 并联电容器,近两年平均月有功供电量 85 万 kW·h,功率因数 0.73;经回归分析,确定负荷曲线形状系数为 1.058,计算出相应线损率为 4.471%。

表 1 所示为三个运行方式下的月用电量及线路首端取 10.5 kV 时的线路最大、最小电压点的电压值。表 2 A, 5 所列灵敏度排序中的前 5 个

值,且以月为基础,乘以 12 后即得一年的量.

按照无功缺额计算,单点补偿量为  $Q_{\text{per}} = 300 \text{ kV}\cdot\text{A}$ ,需要两个补偿点.

使用 PROG1 的优化计算后得出,应在 48 和 61 点各加  $300 \text{ V}\cdot\text{A}$  的并联补偿.计算过程记录列于表 3,补偿后的灵敏度最大前 5 个值列于表 4.经与其它 10 kV 配电线路的计算结果相比较,选定几种电容器型号.经 PROG3 人机交互调整后,相关指标列于表 5 和表 6,最终方案列于表 7.表 7 中还给出了另外 4 条线路的最终方案.

表 1 白东线三种运行方式的月电量和电压				
Tab.1 Electric quantities and voltages in one month for the Baidong line under three operation modes				
运行方式	月电量/ (万 kW·h)	功率因数	$U_{\text{max}}/$ kV	$U_{\text{min}}/$ kV
正常方式	85	0.73	10.411	10.239
最大方式	122.4	0.73	10.370	10.119
最小方式	64.8	0.73	10.433	10.303

表 2 白东线初始最大前 5 个灵敏度					
Tab.2 The largest five sensitivities in the Baidong line under the original mode 元/( kV·A )					
节点号	50	49	48	46	47
灵敏度值	9.947	9.686	9.488	9.451	9.440

表 7 最终方案										
Tab.7 Final schemes										
线路名称	月电量/ (万 kW·h)	年负荷曲线形状系数 $K$	补偿配置		功率因数		线损率/%		年节约效益	
			节点	容量/ (kV·A)	每相/ (kV·A)	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后	电量/(kW·h) 电费/元
白东	85	1.058	48	360	$2\times 60$	0.73	0.90	4.47	3.78	70487 27137
			61	180	$1\times 6$					
			11	300.6	$3\times 33.4$					
白西	85	1.058	30	100.2	$1\times 33.4$	0.77	0.92	4.70	3.72	100015 38408
			35	200.4	$2\times 33.4$					
城少	30	1.027	32	60	$1\times 20$	0.86	0.91	5.95	5.81	9303 3582
			42	100.2	$1\times 33.4$					
村告	26	1.023	7	60	$1\times 20$	0.78	0.92	4.30	4.20	3270 1259
			4	- 10	$10/3$					
			10	- 10	$10/3$					
村关	27	1.022	35	200.4	$2\times 33.4$	0.71	0.91	5.99	5.48	95670 36833

由表 1 可见,电压约束主要考虑的是重负荷下的最低电压和轻负荷下的最高电压.比较表 2 和表 3,尽管节点 48 的灵敏度排在第三,但在该点增设  $300 \text{ V}\cdot\text{A}$  的补偿后效果最优.可见, $Q_{\text{per}}$

表 3 白东线用 PROG1 计算过程记录				
Tab.3 Record of the computational process by using PROG1 for the Baidong line				
序号	补偿节点号	补偿量/ (kV·A)	补偿后灵敏 度/(元/kV·A)	补偿后 功率因数
1	48	300	3.8792	0.826
2	61	300	- 0.8170	0.919

表 4 白东线经 PROG1 后的最大前 5 个灵敏度					
Tab.4 The largest five sensitivities in the Baidong line after using PROG1 元/(kV·A)					
节点号	16	15	36	14	35
灵敏度值	2.546	2.458	2.262	2.219	2.216

表 5 白东线经 PROG3 后的最大前 5 个灵敏度					
Tab.5 The largest five sensitivities in the Baidong line after using PROG3 元/(kV·A)					
节点号	16	36	15	35	34
灵敏度值	2.754	2.711	2.666	2.665	2.595

表 6 白东线经 PROG3 后的电压和功率因数			
Tab.6 Voltages and power factors of the Baidong line after using PROG3			
运行方式	功率因数	$U_{\text{max}}/$ kV	$U_{\text{min}}/$ kV
正常方式	0.902	10.432	10.312
最大方式	0.850	10.391	10.193
最小方式	0.948	10.454	10.376

$= 0$  处的灵敏度和  $Q_{\text{per}} = 300 \text{ kV}\cdot\text{A}$  的实际效果有所偏差,说明准确试算的必要性;然而,在几十条线路的试算过程中,最优节点均在灵敏度最大的前 5 个中.另外,增设并联补偿后,各点的灵敏度

值均有所下降,参见表 4.

表 5 中的灵敏度值比表 4 中的大,说明利用 PROG3 进行的调整使经济性受到损失,即考虑更多实际因素所付的代价.

在对白东线的整个处理过程中,电压约束未起作用,最终调整时,补偿点也未改变.对几乎所有线路而言,线路功率约束也不起作用.

另外,电容器介质损失在总损耗中占相当比重,负荷较轻时更为明显,表中未给出数据.

在表 7 所列的线路中,村告线退出了两个点上的原有低压电容器组.白西线和村关线的补偿点在最终调整时有所变化.

总之,灵敏度系数的使用不仅大量减少了 PROG1 和 PROG2 中的准确试算计算量,也为利用 PROG3 最终调整时提供了强有力的依据.

#### 4 结论

本文描述了灵敏度指标在 10 kV 配电线路无功补偿中的应用,包括电能损耗计算、灵敏度计算、软件实现和实际使用.并着重分析了应用于实际系统时的特点和各种因素的考虑,如负荷形状系数的处理、单点补偿容量的选择和人机交互的处理方式等.通过对几十条 10 kV 线路的计算表

明,利用灵敏度指标进行的补偿效果排序,不仅可大幅度减少所需的准确计算量,也为人机交互方式提供有效的调整依据.

#### 参考文献:

- [1] 周双喜,王琦.主配电馈线上固定电容器和可调电容器的最佳配置[J].电力系统自动化,2000,24(4):37-41.
- [2] 王成山,唐晓莉,余贻鑫,等.基于启发式算法和 Bender's 分解的无功优化规划[J].电力系统自动化,1998,22(11):14-17.
- [3] 张勇军,任震,廖美英,等.10 kV 线路杆上无功优化补偿[J].中国电力,2000,33(9):50-52.
- [4] 姚诸香,涂惠亚,徐国禹.基于灵敏度分析的无功优化潮流[J].电力系统自动化,1997,21(11):19-21.
- [5] ABDUL-RAHMAN K H, SHAHIDEPOUR S M, DANESHDOOST M. AI approach to optimal var control with fuzzy reactive loads[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1):88-97.
- [6] SABADOS B, BURGESS E J. Optimal shunt capacitor installation using inductive coordination principles[J]. IEEE T-PAS, 1977, 96(1):222-226.
- [7] 杨秀台.电力网线损的理论计算和分析[M].北京:水利电力出版社,1985.

### Sensitivity Indexes Used for the Reactive Compensation on 10 kV Distribution Feeders

WANG Ke-wen, JIANG Jun-feng, LIU Xian-lin, LI Xiao-lei

(College of Electric Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Based on the particular characteristic of 10 kV distribution feeders, the technique of sensitivity analysis is used in this paper for the computation of reactive compensation. From the view of practical application, the statement begins from the formulation of the optimization problem, computation for the energy loss and voltage distribution, as well as the treatment for the load shape coefficient. The computation and use of sensitivity indexes, the determination for final schemes are then presented in details. Further analysis and discussions are carried out from the computational process and results of some practical 110 kV lines. Therefore, by using the sensitivities of the objective function with respect to nodal reactive injections, the compensation effectivities of all nodes are estimated, and all nodes are arranged in order from responding sensitivity values. Consequently, only several schemes need to be exactly computed. The location and optimum size of parallel capacitors are determined for practical 10 kV feeders with more factors considered.

**Key words:** distribution feeder; sensitivity; reactive compensation; parallel capacitor