

主馈线和分支线路相结合的 配电网无功补偿

丁晓群¹,王 宽¹,王 斌¹,陈宏伟²,刘 峰³

(1. 河海大学 电气工程学院,江苏 南京 210098;

2. 泗水供电公司,山东 泗水 273200;3. 石横发电厂,山东 肥城 271621)

摘要: 针对配电网负荷多变的特点,提出采用电容器对 10 kV 配电网进行无功补偿时,采用分支线路末端配电变压器低压侧和主馈线相结合的优化补偿方式。以系统有功网损、电容器的安置费用加权最小为目标函数。根据配电网辐射状树形分布特征,首先在分支线路末端以提高线路功率因数确定电容器的补偿容量及其类型,然后在主馈线上依无功负荷的分布情况再确定电容器补偿的最佳位置和容量。潮流计算采用配电网广泛使用的前推回代法。最后,以实际电网为例,说明了该算法的可行性和优越性。

关键词: 电容器;配电网;无功补偿;前推回代

中图分类号: TM 714.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)04-0011-04

我国城乡 10 kV 配电网广泛采用树形、多分支的单向辐射型供电方式^[1]。其存在线路供电半径长、功率因数低、线路损耗大、末端电压质量差等特征。因此,在线路上合理安装电容器,可改善系统运行性能、降低网络损耗、提高配电系统的电压质量,具有良好的经济效益和社会效益^[2-3]。

电容器由于其投资省、见效快、安装简便、维护工作量小、事故率低等优点而成为无功补偿设备的首选。对于电容器优化配置问题,理论界已经提出了许多优化算法,如文献[4-9]中应用的遗传算法、模拟退火算法和 Tabu 搜索算法等,它们都是假定在高负荷下无功需求最大来确定补偿位置,然后再确定补偿容量,但在实际工程中有很多节点在低负荷下却需要很大的无功注入。这样,上述算法就无法达到优化补偿的要求。因此,本文针对配电网的特点提出了分支线路末端配电变压器低压侧和主馈线相结合的优化补偿方式。

1 目标函数和约束条件

在不同负荷等级下以系统有功网损和电容器投资成本最小为目标函数,即^[10]

$$\min f = \omega_p k_e \sum_{k=1}^n t_k P_k(\mathbf{x}^k, Q_c^k) + \omega_Q k_b \sum_{j=1}^m Q_c \quad (1)$$

$$\text{s.t. } G(\mathbf{x}^k, Q_c^k) = 0, k=1, 2, \dots, N \text{ (潮流方程)}$$

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \text{ (节点电压约束)}$$

式中 k_e 为每单位能量费用; k 为负荷等级数; t_k 为第 k 种负荷等级下持续时间; $k=1, 2, \dots, n$,

本文中取 $n=3$,即代表低、中、高 3 种负荷等级; $P_k(\mathbf{x}^k, Q_c^k)$ 是在第 k 种负荷等级下系统的有功损耗, $\mathbf{x}^k$ 为第 k 种负荷下各节点的状态变量,即 $\mathbf{x}^k = [p_i, q_i, U_i, \theta_i]$, p_i, q_i, U_i, θ_i 分别表示节点 i 的有功功率、无功功率注入和电压的幅值及其相角; Q_c^k 是在负荷 k 下各节点设定的电容器值; ω_p 为网损权重; ω_Q 为电容器投资权重; k_b 为单位电容器的投资费用(依电容器的类型不同而不同,分固定和可投切 2 种情况); m 为需要配置电容器的节点数。

2 电容器优化配置

电容器优化配置就是在满足系统各种运行条件的限制下,确定电容器的最佳位置、容量及其类型以获得最大的经济效益。本方案采用分支线路和主馈线相结合的优化补偿方式。首先,在功率因数较低的分支线路配电变压器低压侧母线上安装电容器组,此时主馈线上的无功分布将会发生变化。然后,在主馈线上根据无功负荷的分布情况确定主馈线上的电容器最佳补偿容量和位置。下面先讨论分支线路上的电容器优化补偿。

2.1 分支线路补偿容量的确定

2.1.1 补偿原理

在分支线路末端从提高功率因数、降低损耗需要确定补偿容量。输电线路模型见图 1,由始端通过阻抗 $Z=R+jX$ 向负荷传送功

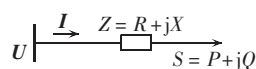


图 1 输电线路模型
Fig.1 Model of power transmission line

率 $S = P + jQ$, 始端电压为 U , 线路电流为 I 。则其有功功率损耗为

$$\Delta P = 3I^2 R \quad (2)$$

而

$$P = \sqrt{3} UI \lambda \quad (3)$$

式中 $\lambda = \cos \varphi$ 为线路功率因数。

由式(2)和(3)两式消去 I , 得:

$$\Delta P = \frac{P^2}{U^2 \lambda^2} R \quad (4)$$

可以看出, 提高线路的功率因数 λ 可以直接达到降损的目的。

将线路功率因数从 $\lambda_1 = \cos \varphi_1$ 提高到 $\lambda_2 = \cos \varphi_2$, 有功损耗降低百分数为

$$\Delta P_s \% = \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{\Delta P_1} \times 100 = \left(\frac{P^2}{U^2 \lambda_1^2} R - \frac{P^2}{U^2 \lambda_2^2} R \right) / \left(\frac{P^2}{U^2 \lambda_1^2} R \right) \times 100 = \left(1 - \frac{\lambda_1^2}{\lambda_2^2} \right) \times 100 \quad (5)$$

所得数据如表 1 所示。

表 1 有功损耗降低百分数

Tab.1 The percent of active power loss reduced

λ_1	λ_2				
	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.60	43.75	50.17	55.55	60.11	64.00
0.65	33.98	41.52	47.84	53.18	57.75
0.70	23.44	32.18	39.50	45.70	51.00
0.75	12.11	22.15	30.56	37.67	43.75
0.80		11.42	20.98	29.08	36.00
0.85			10.80	19.94	27.75
0.90				10.25	19.00
0.95					9.75

2.1.2 补偿容量确定

如果电力网某一线路末端节点典型日平均有功功率为 P_{av} (kW), 补偿前的功率因数为 λ_1 , 补偿后的功率因数为 λ_2 , 则补偿容量的计算公式为

$$Q_c = P_{av} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) =$$

$$P_{av} \left(\sqrt{\frac{1}{\lambda_1^2} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\lambda_2^2} - 1} \right) \quad (6)$$

2.2 配电变压器的励磁无功损耗

配电变压器的励磁无功损耗 ΔQ_T 是用来建立磁场的, 主要消耗在励磁电抗上, 与负荷电流无关。其表达式^[11]为

$$\Delta Q_T = \sqrt{3} U_e I_0 = \frac{I_0 \%}{100} S_e \quad (7)$$

式中 $I_0 \%$ 为变压器空载励磁电流百分数; S_e 为变压器容量。

在配电变压器低压侧采用固定电容器进行补偿, 可以有效地补偿配电变压器空载无功, 使该部分无功就地平衡, 从而提高配电变压器利用率, 降低因无功在线路中流通产生的有功损耗。

2.3 主馈线补偿容量和位置确定

在分支线路末端配置电容器后, 主馈线上的无

功分布将发生变化, 这时再根据无功负荷分布情况确定主馈线上补偿容量和位置, 有 4 种情况。

如果主馈线上的无功负荷是沿线均匀分布, 如图 2(a) 所示, 线路全长为 L , 总无功负荷为 Q , 单位长度负荷密度为 Q_0 。则线路上任一点 x 处的无功潮流为 $Q_x = (L-x)Q_0 = (L-x)Q/L$, 如图 2(b) 所示。为使降损效果最大, 下面讨论其补偿位置和容量。

设在线路 L_1 处补偿容量为 Q_1 , 则补偿后的无功潮流如图 2(c) 所示。

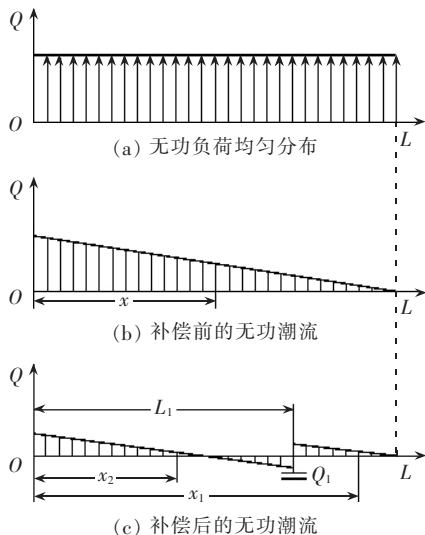


图 2 均布无功负荷单点补偿前后无功潮流分布图

Fig.2 Reactive power flow before and after single-point compensation for evenly distributed var load

线路中各点的无功潮流可如下求出。

a. 补偿点到线路末端上任一点 x_1 处的无功潮流 Q_{x1} 为

$$Q_{x1} = (L-x_1)Q_0 = (L-x_1)Q/L, \quad x_1 \in [L_1, L] \quad (8)$$

b. 起点到补偿点上任一点 x_2 处的无功潮流 Q_{x2} 为

$$Q_{x2} = (L-x_2)Q_0 - Q_1 = (L-x_2)Q/L - Q_1, \quad x_2 \in [0, L_1] \quad (9)$$

因此, 有功网损减小值为

$$\begin{aligned} \Delta P = & \int_0^{L_1} \frac{Q_{x2}^2}{U^2} r dx - \int_0^{L_1} \frac{Q_{x2}^2}{U^2} r dx_2 = \\ & \frac{1}{U^2} \left\{ \int_0^{L_1} \left[(L-x) \frac{Q}{L} \right]^2 r dx - \int_0^{L_1} \left[(L-x_2) \frac{Q}{L} - Q_1 \right]^2 r dx_2 \right\} = \frac{r L_1 Q_1}{U^2 L} (2LQ - LQ_1 - L_1 Q) \end{aligned} \quad (10)$$

式中 r 为线路单位长度的电阻。

求 ΔP 的最大值, 令 $\frac{\partial \Delta P}{\partial Q_1} = 0, \frac{\partial \Delta P}{\partial L_1} = 0$, 得:

$$\begin{aligned} 2LQ - 2LQ_1 - L_1 Q &= 0 \\ 2LQ - 2L_1 Q - LQ_1 &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

解出有

$$L_1 = 2/3 L, \quad Q_1 = 2/3 Q$$

即对单点补偿而言, 补偿地点应装设在距线路首端

为线路全长的 2/3 处,补偿容量为全线所需无功容量的 2/3。

同理,当无功负荷沿线递增、递减、等腰分布时,通过计算得最佳补偿容量和位置如表 2 所示。

表 2 各种无功负荷分布下的电容器
最佳补偿位置和容量

Tab.2 Optimal position and capacity of
compensating capacitor for different
var load distributions

分布情况	单点补偿		2 点补偿			
	L_1/L	Q_1/Q	L_1/L	L_2/L	Q_1/Q	Q_2/Q
平均分布	2/3	2/3	2/5	4/5	2/5	2/5
递增分布	0.775	0.800	0.54	0.86	0.193	0.259
递减分布	0.442	0.626		略		
等腰分布	0.554	0.796		略		

主馈线上电容器配置一般通过在线路杆塔上安装实现,存在维护工作量大、受安装环境限制等问题。因此,线路补偿的点数不宜过多,一般不超过 2 点。

3 电容器类型确定和分组

3.1 分支线路上电容器类型确定和分组

按式(6)计算 3 种不同负荷等级下的补偿容量 Q_f^k ,来确定电容器的类型并分组。

取低负荷下某一支线路末端节点的有功功率 P_1 和原始功率因数 λ_z ,目标功率因数为 λ ,则由式(6)计算出低负荷下的补偿容量 Q_f^1 ,得:

$$Q_f^1=P_1\left(\sqrt{\frac{1}{\lambda_z^2}-1}-\sqrt{\frac{1}{\lambda^2}-1}\right)$$
 (12)

将其和变压器励磁无功损耗 ΔQ_T 相加作为固定补偿,即

$$Q_g=Q_f^1+\Delta Q_T=P_1\left(\sqrt{\frac{1}{\lambda_z^2}-1}-\sqrt{\frac{1}{\lambda^2}-1}\right)+\frac{I_0\%}{100}S_e$$
 (13)

取中负荷下某一支线路末端节点的有功功率 P_2 和原始功率因数 λ_z ,目标功率因数为 λ ,同样根据式(6)计算得中负荷下的补偿容量 Q_f^2 为

$$Q_f^2=P_2\left(\sqrt{\frac{1}{\lambda_z^2}-1}-\sqrt{\frac{1}{\lambda^2}-1}\right)$$
 (14)

将式(14)减去式(12)作为可投切补偿电容器 1 组,即

$$Q_{k1}=Q_f^2-Q_f^1$$
 (15)

取高负荷下某一支线路末端节点的有功功率 P_3 和原始功率因数 λ_z ,目标功率因数为 λ ,同样根据式(6)计算得高负荷下的补偿容量 Q_f^3 为

$$Q_f^3=P_3\left(\sqrt{\frac{1}{\lambda_z^2}-1}-\sqrt{\frac{1}{\lambda^2}-1}\right)$$
 (16)

将式(16)减去式(14)作为可投切补偿电容器 2 组,即

$$Q_{k2}=Q_f^3-Q_f^2$$
 (17)

3.2 主馈线上电容器类型确定和分组

分支线路补偿后,在高负荷下根据主馈线上无功分布情况确定补偿位置,计算此情况下的潮流得平衡节点的注入无功,它等于所有无功负荷和各种损耗的无功之和,即计算主馈线上补偿电容器容量 Q_z^3 所需要的总的无功容量 Q ,计算补偿容量 Q_z^3 。

用同样的方法分别计算在中、低负荷等级下的补偿容量 Q_z^2, Q_z^1 ,将 Q_z^1 作为固定电容器补偿, $Q_z^2-Q_z^1$ 作为可投切电容器 1 组,将 $Q_z^3-Q_z^2$ 作为可投切电容器 2 组($Q_z^k, k=1,2,3$,分别代表低、中、高负荷等级下主馈线上的电容器补偿容量)。

4 电容器优化配置步骤

- 在电容器的优化配置过程中,采取以下步骤:
- a. 计算分支线路在 3 种不同负荷等级下的电容器配置容量 Q_f^k 并分组;
 - b. 分支线路补偿后在不同负荷等级下计算潮流,求平衡节点的注入功率,根据负荷分布情况确定主馈线上的最佳补偿位置和容量并将其分组;
 - c. 计算电容器的投资费用;
 - d. 在 3 种不同负荷下进行潮流计算系统网损;
 - e. 最后,比较目标函数 f ,确定最优配置 Q_c 。

5 应用实例

以某地区实际电网为例,用本方法解决电容器优化配置问题。图 3 为实际配电网框图,共有 470 个配电变压器,总容量为 126 830 kV·A,各配电变压器参数、线路参数和负荷均为已知。以 3 年规划考虑,负荷分低、中、高 3 个等级,3 年内各种负荷的持续时间见表 3,取 $k_c=0.5$ 元/kW·h,固定电容器投资系数 $k_{b1}=6$ kvar,可投切电容器投资系数 $k_{b2}=10$ kvar,网损权重 $\omega_p=0.6$,电容器投资权重 $\omega_Q=0.4$,2 个权重是用文献[12]中提到的二元相对比较法确定的,潮流采

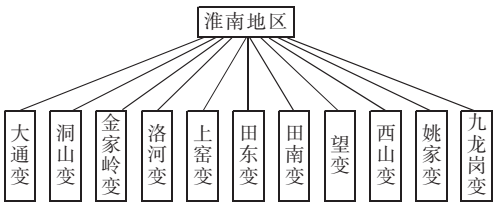


图 3 10 kV 变电所框图
Fig.3 10 kV substations

表 3 3 种负荷的统计时间表
Tab.3 Duration statistics of three kinds of load

负荷等级	t/h	σ
高	2850	1.2
中	20700	1.0
低	2730	0.5

注: t 为持续时间; σ 为该负荷与额定负荷的比值。

用基于支路电流的配电网前推回代法^[13-14]计算,配置结果见表 4。

表 4 电容器优化配置结果

Tab.4 Optimized capacitor configuration Mvar

类 别	分支线路	主馈线
固定电容器	19.62	1.20
可投切电容器	18.51	1.98

分析可知,在分支线路末端配电变压器低压侧母线上固定补偿用于变压器励磁和低负荷时的无功需求,可投切电容器补偿主要用于负荷变大后的无功需求;主馈线上无功补偿基本上都是 1 点,主要是为了改善线路末端电压,补偿度为 2.51%,完全满足国家电力公司规定的主馈线上无功补偿不超过 3 点,补偿度不大于 5%的要求。

从表 5 可以看出电容器优化配置后线损大大降低,电压合格率达到 100%,总目标费用从 280.1×10^4 元降为 138.7×10^4 元,3 年净节约 141.4×10^4 元。

表 5 优化前后对比表

Tab.5 Comparison of indexes before and after optimization

优化配置	电压合格率/%			线损率/%			总费用/ 10^4 元
	A	B	C	A	B	C	
前	100	87	3.33	4.79	7.69	10	280.1
后	100	100	100	1.97	3.76	5.79	138.7

注:A,B,C 分别为低、中、高负荷。

6 结语

本文针对配电网负荷多变的特点,把负荷分为低、中、高 3 个等级,采用在分支线路末端配电变压器低压侧分散补偿和主馈线上集中补偿相结合的方式,将电容器分散安装在功率因数较低的企业、村镇终端变或公用配电变压器低压母线上,具有配置灵活、效果明显等优点,绝对不会出现无功过补的现象。当低负荷时只有固定电容器投入运行,中、高负荷时可投切电容器根据无功需求自动投入运行;而在主馈线上考虑无功负荷的分布情况进行电容器配置,使无功尽量保证就地平衡,主馈线集中配置电容器可以弥补分散配置补偿的不足,并有效改善因输电线路过长而导致线路末端电压低的现象。两者有机结合配置最终达到了减少有功损耗、提高电压质量的目的。实际应用表明了本算法的可行性和优越性。

参考文献:

[1] 苑舜,韩水. 配电网无功优化及无功补偿装置[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
[2] MESUT E B,FELIX F W. Optimal capacitor placement on radial distribution system[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**,1989,4(1):725-734.
[3] TENG J H,CHANG G Y. A network-topology-based

capacitor control algorithm for distribution system[C]// **IEEE/PES 2002 Transmission and Distribution Conference and Exhibition**. [S.l.]:[s.n.],2002:1158-1162.
[4] 张粒子,舒隼,林宪枢,等. 基于遗传算法的无功规划优化[J]. 中国电机工程学报,2000,20(6):13-15.
ZHANG Li-zi,SHU Jun,LIN Xian-shu,et al. Reactive power planning based on genetic algorithm[J]. **Proceedings of the CSEE**,2000,20(6):13-15.
[5] 张伏生,李燕雷,汪鸿. 基于 Tabu 搜索算法的配电网电容器优化配置[J]. 电网技术,2003,27(4):72-75.
ZHANG Fu-sheng,LI Yan-lei,WANG Hong. Optimal configuration of capacitors in distribution network based on Tabu search algorithm[J]. **Power System Technology**,2003,27(4):72-75.
[6] 孙毅,刘俊勇,沈晓东,等. 基于有记忆的模拟退火算法的配电网电容器优化配置[J]. 电力自动化设备,2003,23(10):21-24.
SUN Yi,LIU Jun-yong,SHEN Xiao-dong,et al. Optimal capacitor placement in radial distribution system based on simulated annealing with memory[J]. **Electric Power Automation Equipment**,2003,23(10):21-24.
[7] 余欣梅,李妍,熊信良,等. 基于 PSO 考虑谐波影响的补偿电容器优化配置[J]. 中国电机工程学报,2003,23(2):117-120.
YU Xin-mei,LI Yan,XIONG Xin-gen,et al. Optimal shunt capacitor placement using particle swarm optimization algorithm with harmonic distortion consideration[J]. **Proceedings of the CSEE**,2003,23(2):117-120.
[8] 吴安官,倪保珊. 电力系统线损[M]. 北京:中国电力出版社,1996.
[9] 侯学勇,丁晓群. 基于遗传-模拟退火算法的配电网电容器优化配置[J]. 电网技术,2005,29(4):81-84.
HOU Xue-yong,DING Xiao-qun. Optimal configuration of capacitors in radial distribution network based on genetic-improved simulated annealing algorithm[J]. **Power System Technology**,2005,29(4):81-84.
[10] 方兴,郭志忠. 配电网电容器优化的研究[J]. 继电器,2004,32(9):60-64.
FANG Xing,GUO Zhi-zhong. Study on algorithms of optimal capacitor placement and switching problem in distribution network[J]. **Relay**,2004,32(9):60-64.
[11] 陆定安. 发电厂变电所及电力系统的无功功率[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
[12] 黄健元. 模糊集及其应用[M]. 宁夏:宁夏人民教育出版社,1999.
[13] 李华东,韩学山,卢艺,等. 配电网潮流计算的实用算法[J]. 东北电力学院学报,1997,17(1):57-63.
LI Hua-dong,HAN Xue-shan,LU Yi,et al. Load flow practical algorithm in power distribution system[J]. **Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering**,1997,17(1):57-63.
[14] 诸骏伟. 电力系统分析[M]. 北京:中国电力出版社,1995.

(责任编辑:康鲁豫)

(下转第 86 页 continued on page 86)

作者简介:

丁晓群(1956-),男,江苏丹阳人,教授,主要从事人工智能在电力系统中的应用、电气设备故障诊断及配电自动化领域的科研和教学工作;

王宽(1981-),男,内蒙古通辽人,硕士研究生,主要从

事电力系统运行与控制方面的研究 (E-mail:wangkuan00052222@sohu.com);

王斌(1981-),男,江苏苏州人,硕士研究生,主要从事电力系统运行与控制方面的研究;

陈宏伟(1967-),男,山东泗水人,副总工程师,主要从事电力系统运行与控制研究工作;

刘峰(1981-),男,山西大同人,工程师,主要从事发电厂运营管理工作。

Distribution network var compensation considering both feeder and branches

DING Xiao-qun¹, WANG Kuan¹, WANG Bin¹,
CHEN Hong-wei², LIU Feng³

- (1. Department of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
- 2. Sishui Power Supply Company, Sishui 273200, China;
- 3. Shiheng Power Plant, Feicheng 271621, China)

Abstract: A var compensation scheme, which considers both main feeder and transformer low-voltage side of branch lines, is proposed for 10 kV distribution network with capacitors. The objective function is to make minimum the sum of power loss and capacitor installation cost with their weights. Considering the radial structure of distribution network, the capacity and type of capacitor at end of branches are decided first for increasing the line power factor, and then the optimal position and capacity on main feeder are decided according to the var distribution. The forward-backward sweep method is adopted in power flow calculation. Practice in an actual power network has proved its feasibility and superiority.

Key words: capacitor; distribution network; reactive power compensation; forward-backward sweep method