

配电线路的电容补偿分析与讨论

江钧祥¹, 宋少敏¹, 陶梅²

(1. 合肥华威自动化有限公司, 安徽 合肥 230011; 2. 安徽省电力科学研究院, 安徽 合肥 230022)

摘要:为了降低 10 kV 配电线路的线损, 安装电容器可达到节能的目的。通过对在线路上安装电容器组前后的线损情况进行分析后表明, 安装电容器后可以大幅度减少无功电流在线路上的流动, 降低了线路损耗, 节能效果十分显著。文中的线损降低率 η 与无功补偿度 K 、长度比 L 之间的关系式以及电容器补偿量和安装位置的选取、无功补偿量的调节和控制、关口表功率因数示值与降损的关系等均可作为线路无功补偿装置的设计和运行提供参考。

关键词: 电容补偿; 线损降低率; 补偿度; 长度比

中图分类号: TM726 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-1757(2012)02-0012-05

Analysis and Discussion of Capacitor Compensation for Transmission Lines

JIANG Jun-xiang¹, SONG Shao-min¹, TAO Mei²

(1. Hefei Huawei Automation Co., Ltd., Hefei 230011, China;

2. Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230022, China)

Abstract: In order to reduce the loss of 10 kV distribution line and achieve the goal of power saving, by analyzing and comparing the power losses of transmission lines with and without capacitor compensation, it is concluded that installing capacitors in the transmission system may reduce the reactive current through the transmission lines and which cut down the power losses apparently. All the data, equations and results in the paper may be used as the reference for design and operation of the reactive compensation devices for transmission lines, e. g. the equation relating the reduction rate of line losses η , the reactive power compensation degree K and the length ratio L , the capacity and location design strategy for capacitor compensator, the regulation of the compensation amount and the relation between power factor readings of electricity meter and the line losses.

Keywords: capacitor compensation; reduction rate of line losses; compensation degree; length ratio

0 引言

在我国较小的电力用户一般由 10 kV 配电线路进行供电, 在线路沿线挂接着众多的电力负荷。随着国民经济的发展, 用户的数量与负荷日益增加, 大量的无功电流在线路上流动, 线路的损耗亦同步上升, 在日益重视节能的形势下, 如何降低配电线路的损耗已是目前急需解决的问题, 根据配电网的无功补偿应按照“全面规划、合理布局、分级补偿、就地平衡”的基本原则^[1-2], 在线路上适

当地用电容器组进行无功补偿是一个较好的解决方法。

1 电容补偿前的线路损耗分析

图 1 所示的为补偿前的示意图, 配电线路的长度为 S , 由变电所 10 kV 母线供电, 在线路上均匀地分布着电力负荷。

变电所母线提供的线路总负荷电流为 I , 由于负荷一般均为感性负荷, 所以变电所在提供有功电流 I_p 的同时, 亦需提供容性无功电流 I_q , 显然:

收稿日期: 2011-12-16

• 12 •

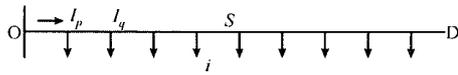


图 1 无功补偿前的线路简化示意图
Fig. 1 Simplified circuit sketch map before reactive power compensation

$$I = \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (1)$$

这时 线路的功率因数 $\cos\varphi$ 为:

$$\cos\varphi = I_p / \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (2)$$

由于负荷均匀地分布在线路上,所以线路上每一点的电流 i 是不相同的。

$$i = I - IX/S \quad (3)$$

式中 $0 \leq X \leq S$, $\vec{i} = \vec{i}_p + \vec{i}_q$

$$i_p = I_p - I_p X/S \quad (4)$$

$$i_q = I_q - I_q X/S \quad (5)$$

电流 i 在线路上产生的损耗 ΔP 为:

$$\Delta P = \int i^2 r dX = \int i_p^2 r dX + \int i_q^2 r dX = \Delta P_p + \Delta P_q \quad (6)$$

式(6)中, ΔP_p 为有功电流在线路上输送过程中产生的损耗,这部分是不能降低的。 ΔP_q 为无功电流在线路上输送过程中产生的损耗,它可以通过电容补偿,以减少无功电流及其输送距离来降低。所以,下面仅讨论无功电流 i_q 在线路上产生的损耗 ΔP_q :

$$\Delta P_q = \int_0^S i_q^2 r dX \quad (7)$$

式中 r 为单位线路长电阻

$$\Delta P_q = \int_0^S (I_q - I_q X/S)^2 r dX =$$

$$r I_q^2 \int_0^S (1 - X/S)^2 dX$$

$$\Delta P_q = I_q^2 r S / 3 \quad (8)$$

2 线路电容补偿后的损耗

如图 2 所示,设线路上的 C 点接入电容器组进行补偿,其电容电流为 I_c ,方向见图 2。

电容器接入后,线路上的无功电流就发生变化,其关系如下:

$$I_{qc} + I_c = I_q \quad (9)$$

$$I_{c1} + I_c = I_{c2} \quad (10)$$

$$I_{c1} = I_{qc} - I_q S_1 / S \quad (11)$$

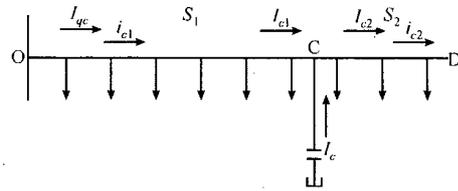


图 2 无功补偿后的线路简化示意图
Fig. 2 Simplified circuit sketch map after reactive power compensation

式(9)~(11)中 I_{qc} 为接入电容器后变电所母线提供的无功电流; I_{c1} 为线路上注入 C 点的无功电流; I_{c2} 为线路上由 C 点流入 D 点的无功电流; S_1 为线路 OC 的长度; S_2 为线路 CD 的长度; S 为线路 OD 的长度。

线路 OC 段任一点电流:

$$i_{c1} = I_{qc} - I_q X_1 / S \quad (0 \leq X_1 \leq S_1) \quad (12)$$

线路 CD 段任一点电流:

$$i_{c2} = I_{c2} - I_q X_2 / S \quad (0 \leq X_2 \leq S_2) \quad (13)$$

式(12)~(13)中 X_2 为该点距 C 点的距离。

线路 OC 段的损耗 ΔP_{c1} 为:

$$\Delta P_{c1} = \int_0^{S_1} i_{c1}^2 r dX = r \int_0^{S_1} (I_{qc} - I_q X_1 / S)^2 dX$$

线路 CD 段的损耗 ΔP_{c2} 为:

$$\Delta P_{c2} = \int_0^{S_2} i_{c2}^2 r dX = r \int_0^{S_2} (I_{c2} - I_q X_2 / S)^2 dX$$

线路 OD 段的总损耗 ΔP_c 为:

$$\Delta P_c = \Delta P_{c1} + \Delta P_{c2} = r \int_0^{S_1} (I_{qc} - I_q X_1 / S)^2 dX + r \int_0^{S_2} (I_{c2} - I_q X_2 / S)^2 dX \quad (14)$$

设 $K = I_c / I_q$, K 为补偿度; $L = S_1 / S$, L 为安装点的长度比(安装点到变电所母线的线路长度与线路总长度之比)。

对式(14)进行积分并整理后,可得:

$$\Delta P_c = I_q^2 r S [1 - 6KL + 3K^2 L + 3KL^2] / 3 \quad (15)$$

从式(15)可知,线路进行电容补偿后,其线路损耗大小与补偿度 K 和安装点的长度比 L 有关。

3 线路电容补偿后的线损降低率 η

线损降低率 η 可用下式表示:

$$\eta = [(\Delta P_q - \Delta P_c) / \Delta P_q] \times 100\% \quad (16)$$

用式(8)和式(15)代入,整理后得:

$$\eta = 6KL - 3K^2L - 3KL^2 \quad (17)$$

要求取 η 的最大值,可对 K 、 L 取偏导数,并令其值等于零,整理后得:

$$2 - 2K - L = 0 \quad (18)$$

$$2 - K - 2L = 0 \quad (19)$$

联列解式(18)与式(19)得: $K = 2/3$ $L = 2/3$

将 K 、 L 值代入式(17)得 η 的极大值为:

$$\eta = 8/9 \text{ 或 } \eta = 88.9\%$$

也就是说,当电容器组的补偿度为 $2/3$,其安装地点离变电所的距离为 $2/3$ 线路总长度时,能取得最佳降损效果,其线损降低率 η 为 88.9% 。

这时,线路上各点的无功电流计算如下:

$$\text{因 } K = 2/3, \text{ 所以 } I_c = 2I_q/3 \quad (20)$$

由式(9)得:

$$I_{qc} = I_q - I_c = I_q/3 \quad (21)$$

由式(11)得:

$$I_{c1} = I_{qc} - I_qL = -I_q/3 \quad (22)$$

前面的“-”号表示其方向与设定的相反。

由式(10)得:

$$I_{c2} = I_{c1} + I_c = I_q/3 \quad (23)$$

比较式(22)与式(23)可知 $I_{c2} = -I_{c1} = I_q/3$, 即大小相等、方向相反,这样才能取得最佳降损效果。

由式(5),线路进行电容补偿前的任一点无功电流 i_q 为:

$$i_q = I_q - I_qX/S$$

当 $X = 2S/3$ 时(即位于 C 点)

$$i_q = I_q/3 = I_{c2}$$

这说明由 C 点流向线路末端 D 的无功电流的大小不会因进行电容补偿而发生变化。

电容器组在线路上安装后,一般来说其位置不会变更,也就是 L 不变,但其补偿度 K 实际上要随着线路负荷的无功需要变化而发生变化,这样其线损降低率 η 也同样改变。下面就这一问题进行讨论。

1) 假设电容器组在线路上按 $K = 2/3$ 、 $L = 2/3$ 设计安装,运行后,线路负荷的无功负荷下降,即补偿度 K' 增加,若 $K' = K + \alpha = 2/3 + \alpha$,则此时的线损降低率 η' 为:

$$\eta' = 6K'L - 3K'^2L - 3K'L^2 = 8/9 - 2\alpha^2 \quad (24)$$

2) 同样无功负荷增加,补偿度 K'' 减少,若 $K'' = K - \alpha = 2/3 - \alpha$,此时 η'' 为:

$$\eta'' = 6K''L - 3K''^2L - 3K''L^2 = 8/9 - 2\alpha^2 \quad (25)$$

比较 η' 与 η'' 后可知,当补偿度 $K = 2/3$ 时,不论补偿度 K 增加或减少 α ,其线损降低率均下降一个相同的幅度 $2\alpha^2$ 。

对于不同的 K 与 L ,其线损降低率均不同,具体见表 1。

表 1 不同 K 与 L 时的线损降低率 $\eta/\%$
Tab.1 The reduction rate of line losses (taking K and L as references)

L	K										
	1.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	2/3	0.7	0.8	0.9
0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	5.4	10.2	14.4	18.0	21.0	23.4	24.7	25.2	26.4	27.0	27.0
0.2	10.2	19.2	27.0	33.6	39.0	43.2	45.3	46.2	48.0	48.6	48.0
0.3	14.4	27.0	37.8	46.8	54.0	59.4	62.0	63.0	64.8	64.8	63.0
0.4	18.0	33.6	46.8	57.6	66.0	72.0	74.7	75.6	76.8	75.6	72.0
0.5	21.0	39.0	54.0	66.0	75.0	81.0	83.3	84.0	84.0	81.0	75.0
0.6	23.4	43.2	59.4	72.0	81.0	86.4	88.0	88.2	86.4	81.0	72.0
2/3	24.7	45.2	62.0	74.7	83.0	88.0	88.9	88.7	85.3	78.0	66.7
0.7	25.2	46.2	63.0	75.6	84.0	88.2	88.7	88.2	84.0	75.6	63.0
0.8	26.4	48.0	64.8	76.8	84.0	86.4	85.3	84.0	76.8	64.8	48.0
0.9	27.0	48.6	64.8	75.6	81.0	81.0	78.0	75.6	64.8	48.6	27.0
1.0	27.0	48.0	63.0	72.0	75.0	72.0	66.7	63.0	48.0	27.0	0.0

由表1可知,当电容器组安装在靠近母线附件(即 $L=0$)不论这时的无功补偿度是多少,其线损降低率 η 均为零,也就是线损没有降低,节能效果为零。例如:无功补偿度 $K=1$ 时,虽然线路关口表的示值 $\cos\varphi_c=1$ (见“6”),但其损降低率 $\eta=0$,也就是没有降损效果,这一点是运行单位必须注意的。

4 实际线路的电容补偿量及其安装位置的确定

实际线路的无功负荷不是固定不变的,它随着季节、时间、负荷的变化而不同,所以在设计时应选择一个比较合理的无功负荷作为基准,以确定电容补偿量。

1) 根据运行日志,统计全年的无功负荷,然后得出其平均无功负荷并计算出 I_q ,取 $I_c=2I_q/3$;根据 I_c 与电容器的额定电压可计算出补偿电容器额定容量。

2) 电容器的补偿容量可根据线路安装的配电变压器总容量的5%~10%来选取^[3]。

电容器组的安装位置直接影响线损降低率 η 的大小,由式(17)可知 L 对 η 的影响与 K 是一样的,这一点由表1可以直接看到。所以,电容器组的安装位置应取 $L=2/3$,以便尽量取得最佳降损效果。但当有一较大的无功负荷与 $L=2/3$ 点相距不远时可考虑就近安装^[4]。

5 补偿电容器组的无功容量输出调节与控制

5.1 电容器的分组投切

1) 当仅有1组补偿电容器时,只要电压允许且在不会发生无功倒送的情况下,应将该电容器组投入,即能起到降损效果。

由式(17) $\eta=3KL(2-K-L)$

因为 $0 < L < 1$ $0 < K \leq 1$;

所以 $\eta > 0$,这说明投入电容器后就有降损效果。

2) 当有2组及以上补偿电容器时,其第1组的投入可根据上述原则。而第2组(或更多)的投入与否,要根据电容器组的安装位置(即安装点的长度比 L)与无功电流来控制。

由式(17) $\eta=6KL-3K^2L-3KL^2$

要取得最佳降损效果,对 K 取偏导数,并令其值等于零,得:

$$6L-6KL-3L^2=0 \quad K=1-L/2$$

$$I_c=KI_q=(1-L/2)I_q \quad (26)$$

$\therefore I_{c2}=(1-L)I_q$,代入式(26),可得:

$$I_c=[(2-L)/(2-2L)]I_{c2}$$

由于线路安装电容器组后,其 L 是不会变的,而 I_{c2} 或无功功率是可以测量的,所以根据 I_{c2} (或无功功率)值就可计算得到 I_c 值,即可控制需要投入的电容器容量。

3) 用分组投切的调节方式可能会对电容器造成以下影响^[5,6]:

①用不重击穿断路器来切合电容器组通常会产第1个峰值不超过 $2\sqrt{2}$ 施加电压(方均根值)标准允许每年可切合1000次。若频繁投切或开关发生重击穿均可能导致电容器因过电压而过早损坏;

②电容器投入电路运行时,特别是将电容器分组接入与已通电的另一部分电容器相并联时,可能产生高频率和高峰值的过渡过电流(涌流)。由开关操作引起的过电流峰值应限制到最大为 $100I_N$ (方均根值),否则同样导致电容器损坏;

5.2 用自耦调压变压器或MCR进行无功调节

自耦调压变压器是用改变电容器输入电压的方法来调节电容器输出的无功容量,其分档较多,每档调节幅度小,不会使电容器输出的无功容量大起大落。

磁阀式可控电抗器(magnetic control reactor, MCR)用输出感性无功容量的方法来调节电容器输出的容性无功容量,其调节过程是平滑无级的,完全能满足所需的无功补偿的要求。

这两种调节方法均不会造成电容器的过电压或过电流,但由于其所需的设备较多,投资费用高,目前实际采用较少^[7,8]。

6 补偿后的功率因数高低与降损效果的关系

线路进行电容补偿后,其关口表的功率因数与补偿度 K 有关,但其功率因数的高低并不能作为判断降损效果的依据。设线路补偿前,变电所

母线输出的有功电流为 I_p , 无功电流为 I_q , 关口表功率因数为 $\cos\varphi$ 。

配电线路用电容器补偿后, 变电所母线输出有功电流为 I_p , 无功电流为 I_{qc} , 关口表功率因数为 $\cos\varphi_c$, 补偿度为 K 。

$$\text{由 } \cos\varphi = I_p / \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \text{ 得:} \\ 1/\cos^2\varphi = 1 + (I_q/I_p)^2 \quad (27)$$

$$I_{qc} = I_q - I_c = I_q - KI_q = (1-K)I_q \\ \cos^2\varphi_c = 1/[1 + (1-K)^2(I_q/I_p)^2] \quad (28)$$

联列解式(27)与式(28)并整理后得:

$$\cos^2\varphi_c = \frac{\cos\varphi}{(1-K)^2(1-\cos^2\varphi) + \cos^2\varphi} \quad (29)$$

当 $K=1$ 时, $\cos\varphi_c = 1$; $K=0$ 时, $\cos\varphi_c = \cos\varphi$

由表1可知补偿度 $K=1$ 时, 其线损降低率 η 一般不会最高, 也就是 $\cos\varphi_c = 1$ 时, 其降损效果不是最好。

例如: 在 $L=2/3$ 处安装电容器组, 若补偿前 $\cos\varphi=0.6$, 当补偿度分别为 $K=1$ 与 $2/3$ 时, 分别计算补偿后的功率因数与线损降低率。

计算可得:

$$K=2/3 \text{ 时 } \cos\varphi_c = 0.91, \eta = 88.9\%$$

$$K=1 \text{ 时 } \cos\varphi_c = 1, \eta = 66.7\%$$

上例说明, 功率因数高时, 其线损降低率 η 可能反而较低。因此, 不能用功率因数的高低来作为判断降损效果的依据, 若只考虑提高关口表功率因数示值, 很可能反而降低了降损效果。

7 小结

通过上边的分析和讨论, 我们得出以下结论:

1) 在配电线路上安装电容器组可以达到降损节能的目的。

2) 实际效果显著。线损降低率 η 与补偿度 K 、安装点的长度比 L 有关。

3) 在不会发生无功倒送的情况下, 只要电压允许, 就可将电容器投入, 即有降损效果。而第2组(及以上)电容器的投入与否, 应根据无功电流 I_{c2} (或无功功率)来控制。

4) 线路关口表的 $\cos\varphi$ 示值不能作为降损效

果的依据。

参考文献:

- [1] 张利生. 电网电能损耗管理及损耗技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 国家电网公司. 电力系统电压质量和无功电力管理规定 [S]. 2004.
- [3] JB/T 10558—2006. 柱上式高压无功补偿装置 [S]. JB/T 10558—2006. Pole mounted high-voltage power factor correction installations [S].
- [4] 朱建军, 卢志刚. 中低压配电网的无功补偿 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(4): 19-23. ZHU Jian-jun, LU Zhi-gang. Reactive power compensation in low and medium voltage distribution grid [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(4): 19-23.
- [5] GB/T 11024.1—2010. 标称电压 1000V 以上交流电力系统用并联电容器 第1部分: 总则 [S]. GB/T 11024.1—2010. Shunt capacitors for a. c. power systems having a rated voltage above 1000 V Part 1: General [S].
- [6] 华东电力管理局. 电力工程电工手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1985.
- [7] 黄留欣, 黄冰, 朱辉. 调压型电压无功自动装置 [J]. 电力电容器, 2004(4): 6-10. HUANG Liu-xin, HUANG Bing, ZHU Hui. Automatical regulation installation of voltage adjustable reactive power [J]. Power Capacitor, 2004(4): 6-10.
- [8] 陶梅, 江钧祥, 葛敏, 等. 电力系统宜用磁阀式可控电抗器进行调节 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(3): 18-22, 69. TAO Mei, JIANG Jun-xiang, GE Min, et al. Power systems magnetic valve controllable reactor for reactive power regulation [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(3): 18-22, 69.

作者简介:

江钧祥(1940—), 男, 高级工程师, 主要从事高压电容器试验工作。

宋少敏(1972—), 男, 高级工程师, 主要从事无功补偿装置与滤波装置的设计制造工作。

陶梅(1964—), 女, 高级工程师, 主要从事电容器检测、无功补偿装置技术研究工作。