

超高压远距离输电线无功补偿容量的实用计算

余秋霞¹, 廖常初^{1,2}

(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学高压及电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 对超高压远距离输电线的运行分析, 提出无功补偿容量的工程实用计算方法, 为超高压远距离输电线无功补偿容量的确定提供理论依据。按该计算方法确定无功补偿容量, 大大节省了无功补偿装置的配置容量, 节约了投资, 并使得无功补偿装置得到有效地利用。

关键词: 远距离输电线; 无功规划; 补偿容量; 实用计算

中图分类号: TM714.3 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004) 13-0028-03

0 引言

在电力市场环境, 随着区域电网的互联, 电网规划对缓解电力供需矛盾, 防止电力瓶颈和输电阻塞, 保证电网安全稳定运行, 都有至关重要的作用。电力系统规划包括电源规划和电网规划, 但由于它们各自的复杂性, 常常把两者独立进行规划。长期以来, 电网规划的常规方法是^[1]首先依据经验, 通过定性分析做出负荷预测, 然后根据确定出的负荷数据, 人为选定几种可行的网络扩建方案, 最后对几个方案进行技术经济分析, 从中找出一个最佳方案。这种方法的优点是直观, 并可以同规划人员的宝贵经验相结合, 缺点是预测精度和方法质量受人的经验限制。

电网规划包括三方面的内容: 负荷预测、网架规划和无功规划。负荷预测是电网规划的首要任务, 完成对未来负荷需求的预测, 其准确度直接关系到规划方案的质量。完成负荷预测后便可以进行网架规划, 根据投资及运行费用最小的原则, 确定电网扩建的类型、时间和地点, 保证可靠地将负荷由发电中心送到负荷中心, 并满足环保要求。网架规划完成后, 就基本实现了有功负荷传输的要求, 无功负荷的传送与补偿由无功规划来完成。无功规划的目的是确定电网中无功补偿设备的类型、容量和安装地点, 以确保电网正常及故障运行方式下的电压质量及稳定性, 并使规划期内投资及运行费用总和最小。

由此可见, 网架规划和无功规划都是复杂的优化问题, 随着计算机技术和智能优化技术的发展, 目前这些工作都可以通过计算机完成, 提高了电网规划的质量和决策水平。随着电力电子技术的发展, 对超高压远距离输电线进行灵活的无功补偿成为可

能, 本文通过对超高压远距离输电线的运行分析, 提出无功规划中补偿容量的实用计算方法。

1 超高压远距离输电线的运行分析

对超高压远距离输电线, 不宜根据其物理长度来判断其为短线路、中长线路或长线路。为了进行准确分析, 应采用分布参数模型, 超高压远距离输电线示意图如图 1 所示, 由《电路理论》可得到超高压远距离输电线的分布参数方程^[2]:

$$V_x = V_R \cos \alpha x + j I_R Z_C \sin \alpha x \quad (1)$$

$$I_x = I_R \cos \alpha x + j \frac{V_R}{Z_C} \sin \alpha x \quad (2)$$



图 1 远距离输电线示意图

Fig. 1 Long-distance transmission line

下标 S, R 分别代表输电线的发送端和受端, 发送端、受端电压分别为 V_S, V_R ; 以受端为基准, 距受端 x 处的电压、电流分别为 V_x 和 I_x ; 受端电流为 I_R 。参数方程中的 Z_C 是输电线的波阻抗, 是输电线的传播参数。 $\alpha = \sqrt{L_1 C_1}$, 为电流的角频率; L_1, C_1 为输电线的单位长度电感和电容值; $Z_C = \sqrt{L_1 / C_1}$ 。

1.1 输电线的无功特性

当输电线路的受端负载阻抗 Z_R 等于波阻抗 Z_C , 由于 $V_R = I_R Z_R$, 由参数方程 (1) (2) 可得全线的电压、电流幅值处处相等。输电线的等效电感吸收无功 Q_L , 等效电容发出无功 Q_C , 可以证明此时 $Q_L = Q_C$, 受端获得的有功功率 $P_R = V_R^2 / Z_C$, 令 V_R

= $V_S = V_N$ (V_N 是输电线的额定电压), 则受端获得的有功功率与输电线的自然功率 $P_N = V_N^2 / Z_C$ 相等。 P_N 是输电线无功状态的分界点^[2]: 当 $P_R > P_N$ 时, $Q_L > Q_C$, 线路吸收无功; 当 $P_R < P_N$, $Q_L < Q_C$, 线路发出无功。因此, 超高压远距离输电线在低负荷时会出现无功过剩, 导致过电压; 高负荷时会出现无功不足, 导致电压偏低。这就是通常所说的远距离输电线在夜间出现过电压, 白天高负荷时低电压现象。通常采用无功补偿设备来保证超高压远距离输电线在不同负荷水平下的运行电压在合格范围内。

1.2 输电线的空载运行

设输电线长度为 l , 传播角 $\beta = l$, 输电线空载运行, 受端开路, $I_R = 0$, 代入参数方程可得发送端电压电流为:

$$V_S = V_R \cos \beta \quad (3)$$

$$I_S = j \frac{V_R}{Z_C} \sin \beta \quad (4)$$

为了使线路并列时两端电压差在允许范围内, 在对超高压远距离输电线进行充电前应使充电端电压在由式(3)确定的规定范围内。对线路进行解列常操作时, 为了使线路两端不过电压, 解列前应控制电压在由式(3)确定的范围内。线路故障跳闸时, 因为空载时首末端电压比值恒定, 这往往在超高压远距离输电线继电保护中作为保护依据(受端跳闸后联跳发送端)。由式(4)得发送端有容性的充电电流, 容性充电功率 $Q_S = 3 V_S I_S$ (V_S 、 I_S 在三相系统中对应于发送端的相电压、相电流)。

1.3 输电线的负载运行

输电线负载运行时, 设 V_S 与 V_R 的夹角为 θ , 得受端有功、无功方程^[2]:

$$P_R = \frac{V_S V_R}{Z_C \sin \beta} \sin \theta \quad (5)$$

$$Q_R = \frac{V_R}{Z_C \sin \beta} (V_S \cos \theta - V_R \cos \beta) \quad (6)$$

1.4 远距离输电线无功补偿的等效计算

1.4.1 并联补偿的等效计算

在距受端 l_2 处的 m 点安装并联补偿装置, 电纳为 jB_{sh} , 定义 $\beta_1 = l_1$, $\beta_2 = l_2$, $\beta = l = (l_1 + l_2) = \beta_1 + \beta_2$, 由参数方程(1)、(2)得:

$$V_m = V_R \cos \beta_2 + j I_R Z_C \sin \beta_2 \quad (7)$$

$$I_{m2} = I_R \cos \beta_2 + j \frac{V_R}{Z_C} \sin \beta_2 \quad (8)$$

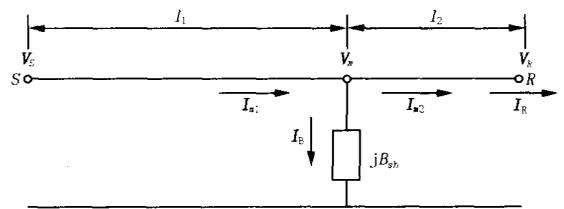


图2 中间有补偿的远距离输电线示意图

Fig. 2 Long-distance transmission line with compensation intermediately

又 $I_B = j B_{sh} V_m$, $I_{m1} = I_{m2} + I_B$, 结合式(7)、(8), 以 m 点为受端, 利用参数方程(1)、(2)可推导出:

$$V_S = k V_R + j I_R X_{eq} \quad (9)$$

式中: $k = \cos \beta_1 - B_{sh} Z_C \sin \beta_1 \cos \beta_2$, $X_{eq} = Z_C \sin \beta_1 - B_{sh} Z_C^2 \sin \beta_1 \sin \beta_2$ 。补偿体现在对 k , X_{eq} 的修正。由式(5)、(6)可得:

$$P_R = \frac{V_R V_S}{X_{eq}} \sin \theta \quad (10)$$

$$Q_R = \frac{V_R}{X_{eq}} (V_S \cos \theta - k V_R) \quad (11)$$

与无补偿时相比, 当并联补偿器为容性设备时, $B_{sh} > 0$, $X_{eq} < Z_C \sin \beta_1$, 最大传输有功功率 P_{Rmax} 增加, $k < \cos \beta_1$, 受端无功功率 Q_R 增加; 当并联补偿器为感性设备时, $B_{sh} < 0$, $X_{eq} > Z_C \sin \beta_1$, 最大传输有功功率 P_{Rmax} 减小, $k > \cos \beta_1$, 受端无功功率 Q_R 减小。

1.4.2 串联补偿的等效计算

串联补偿一般串联电容器, 在距受端 l_2 处的 m 点安装串联补偿装置(如图3), 其电抗为 $-jX_C$, $X_C = 1 / \omega C$ 。类似并联补偿的推导方法, 因为 $I_1 = I_2$, $U_1 = U_2 - j I_1 X_C$, 由线路末端向首端推导, 可得到与式(9)形式相同的公式, 式中的 $k = \cos \beta_1 + \frac{X_C}{Z_C} \cos \beta_1 \sin \beta_2$, $X_{eq} = Z_C \sin \beta_1 - X_C \cos \beta_1 \cos \beta_2$ 。与无补偿时相比, k 增大, X_{eq} 减小, 最大传输有功功率 P_{Rmax} 增加, 受端无功功率 Q_R 减小。

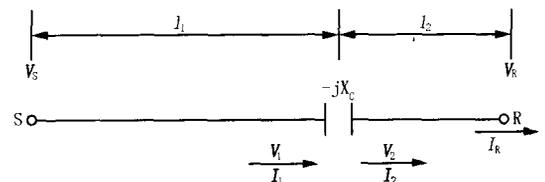


图3 中间有串联补偿的远距离输电线示意图

Fig. 3 Long-distance transmission line with series-compensation intermediately

2 补偿容量的工程实用计算

2.1 补偿容量的确定

随着电力系统的发展,越来越多的远离负荷中心的大容量发电厂相继投运,各大区域电网逐渐互联形成联合电力系统,超高压远距离输电线担负着连接受端与远区大容量发电厂或区域电网的任务。由于无功功率不能远距离传输,必须采用无功补偿装置。无功补偿是电力系统安全经济运行的重要措施之一,合理的无功补偿可以改善系统的性能。在有自动无功补偿的情况下,可令 $V_S = V_R = V_N$,代入式(6)可得:

$$Q_R = \frac{V_N^2}{Z_C} \frac{1}{\sin} (\cos - \cos) \quad (12)$$

以超高压远距离输电线的自然功率 P_N 为基准,基准电压取额定电压,用标么值表示可得 $P_R = \frac{\sin}{\sin}$,与式(12)联立可得:

$$Q_{R^*} = \frac{1}{\sin} (\sqrt{1 - (P_R \cdot \sin)^2} - \cos) \quad (13)$$

设受端功率因数角为 α_R ,负载无功为 Q_{RL} ,无功补偿容量为 Q_{RC} (发无功为正),则:

$$Q_{RC^*} = Q_{RL^*} - Q_{R^*} = P_R \cdot \tan \alpha_R - \frac{1}{\sin} (\sqrt{1 - (P_R \cdot \sin)^2} - \cos) \quad (14)$$

补偿容量的工程实用计算的依据就是式(14)。按 P_{Rmax} 及其对应的 α_R 可计算出 Q_{RCmax} ;按 P_{Rmin} 及其对应的 α_R 可计算出 Q_{RCmin} 。

2.2 补偿设备安装位置的确定

为使传输的有功功率最大,应该使 X_{eq} 最小,由串补和并补的 X_{eq} 表达式 $\frac{dX_{eq}}{d} = 0$ 可推导出 $l_1 = l_2$,即补偿设备应安装在输电线的中点。串补、并补的选择应比较补偿容量等技术经济指标后确定。

在负荷预测和网架规划完成后,对某一具体的超高压远距离输电线的长度和线型,以及传输功率、负荷等情况也就清楚了。 α_R , P_R , α_R 以及自然功率 P_N 等都已已知,由式(12)可以计算出无功补偿容量的配置,按规划要求再乘一个裕量系数,进而确定安装位置,安装位置和容量确定后,由式(11)对受端无功进行校验。然后根据待选无功设备的单位容量,配置无功补偿设备。

3 结论

在《电力系统安全稳定导则》规定^[3]“330 kV 以上等级线路的充电功率应基本上予以补偿”;“无功补偿的原则是就地补偿”。例如:—500 kV 输电线,长400 km,传播角为 30° ,波阻抗为 225 Ω ,以自然功率为基准,由式(3)、(4)可计算得到容性充电功率为 0.57786,假设受端负荷功率因数为 0.8,对应受端不同有功负荷下的无功补偿容量按式(14)计算结果如表 1 所示(均为标么值)。工程上一般采用按充电功率的 90%原则确定无功补偿容量,从表 1 可以看出往往使无功补偿装置容量偏大,不能有效利用。采用本文提出的实用计算方法,可以充分利用无功补偿容量,节省投资,并为无功补偿容量的确定提供理论依据。

表 1 无功补偿容量算例结果

有功负荷	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4
补偿容量	0.499 021	0.383 551	0.274 172	0.170 559	0.072 459

参考文献:

[1] 孙洪波(SUN Hong-bo). 电力网络规划(Electric Power Network Planning) [M]. 重庆:重庆大学出版社(Chongqing:Chongqing University Press),1996.

[2] 何利铨,邱国跃(HE Li-quan, QIU Guo-yue). 电力系统无功功率与有功功率控制(Reactive Power and Active Power Control in Power System) [M]. 重庆:重庆大学出版社(Chongqing:Chongqing University Press),1995.

[3] DL755 - 2001,电力系统安全稳定导则(The Rules on Security and Stability of Power System) [S].

[4] 牟道槐(MOU Dao-huai). 电力系运行与控制硕士生课程讲义(The Teaching Materials of Operation and Control on Power System) [Z]. 重庆:重庆大学(Chongqing:Chongqing University).

收稿日期: 2003-10-22; 修回日期: 2003-11-19

作者简介:

余秋霞(1975 -),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制、电力系统测控与网络通信技术;

E-mail: qiuxia - y @163.com

廖常初(1945 -),男,教授,研究方向为电力系统测控与网络通信技术,PLC 与现场总线应用。

(下转第 39 页 continued on page 39)

- ZHANG Wen-yuan). 配电网潮流支路电流法收敛性研究 (On Convergence of Branch Current Based Distribution Power Flow Calculation) [J]. 西安交通大学学报 (Journal of Xi'an Jiaotong University), 2001, 35(4): 243-246.
- [6] 段刚, 余贻鑫 (DUAN Gang, YU Yi-xin). 电力系统 NP 难问题全局优化算法的研究 (A Study on Global Optimization for NP Hard Problems in Power System) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(5): 14-18.
- [7] 陈国良, 王煦法, 庄镇泉 (CHEN Guo-liang, WANG Xu-fa, ZHUANG Zhen-quan). GA 及其应用 (Genetic Algorithm and Its Application) [M]. 北京: 人民邮电出版社 (Beijing: People's Posts & Telecommunications Publishing House), 1996.
- [8] 李茂军, 童调生 (LI Mao-jun, TONG Tiao-sheng). 用单亲遗传算法求解有序组合优化问题 (A Partheno Genetic Algorithm Solving Serial Combinatorial Optimization) [J]. 系统工程与电子技术 (Systems Engineering and Electronics), 1998, (10): 58-61.

收稿日期: 2003-10-21; 修回日期: 2003-11-18

作者简介:

唐斌 (1980-), 男, 硕士研究生, 从事智能控制及其在电力系统中的应用研究;

E-mail: tangbinfree@yahoo.com.cn

罗安 (1957-), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、现代电力系统控制理论和应用研究。

The improved encoding strategy of genetic algorithm and its application in reconfiguration of distribution networks

TANG Bin, LUO An, WANG Ji

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The paper presents an encoding method of neighboring switches neighboring in the chromosome and switches in the same loop in the same gene. The crossover operation is performed only on the corresponding genes. The mutation and inverse operation is limited within the gene. These strategies greatly reduce the infeasible solutions produced during gene algorithm operations in the application to distribution system reconfiguration. Furthermore, a distribution simplifying method is also proposed to reduce the length of chromosome and enhance the efficiency of the algorithm. The reciprocal value of active power losses is taken to be the fitness function, which will be simple and effective. In particular, the results of several test computations show that the proposed algorithm has higher searching capability.

Key words: genetic algorithm; distribution networks; encoding strategy

(上接第 30 页 continued from page 30)

The practicality calculation of compensating capacity for extra-high voltage and long-distance transmission line

YU Qiu-xia¹, LIAO Chang-chu^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: This paper analyses the operation characteristic of extra-high voltage and long-distance transmission line, introduces the practicality calculation of reactive power compensating capacity, and provides the academic gist for choosing the compensating capacity for extra-high voltage and long-distance transmission line. Choosing the reactive power compensating capacity with this calculation method will take full advantage of the reactive power compensating device and reduce cost.

Key words: long-distance transmission line; reactive power planning; compensating capacity; practicality calculation