

中压配电网计及动态无功补偿装置的理论线损计算

刘甲庆, 张皓, 章健

(郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:结合无功补偿电容器在配电网中的实际应用情况以及配电网的一些自有特点,充分考虑动态无功补偿电容器的投切状态,提出计及动态无功补偿装置的新的理论线损计算方法。该方法根据电容器“投切”动作的时刻将理论线损计算划分为更多的时段,提出新的实时数据处理方式,并且考虑到各个配电变压器日负荷曲线的差异,不仅可以获得比旧有方法精确许多的线损计算结果,而且可以获得在计算时间内的各个细分的小时段内的详细线损情况,明确地表现出加装无功补偿装置对于配电网理论线损的影响,有利于运行人员进行配网线损分析与计算。

关键词:动态无功补偿;配电网;线损计算;电力系统;负荷特性

Theoretical line loss calculation on medium voltage distribution with dynamic reactive power compensation devices

LIU Jia-qing, ZHANG Hao, ZHANG Jian

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: According to the practical situation of capacitor applied in distribution network and some characteristics of distribution network and considering the switching state of dynamic reactive power compensation capacitor, a new method of theoretical line losses calculation is presented by making use of dynamic reactive power compensation devices. This theoretical line loss calculation is divided into more time slots based on the switching states of capacitors, meanwhile a new real-time data processing method is presented, with the differences in daily load curve of distribution transformers taken into consideration. Through the new method, not only is the calculation accuracy improved, but also the detailed line losses in every small period of time can be obtained and the impact for the theoretical line losses of the distribution network with the reactive power compensation devices can be specifically performed, which is helpful to the operator in the analysis and calculation of the distribution network.

Key words: dynamic reactive power compensation; distribution network; line loss calculation; power system; load characteristics

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)06-0092-04

0 引言

配网线损计算是配网经济运行、无功优化、网络规划和电网技术改造等的基础^[1-2]。市场经济的发展要求供电企业以经济效益为中心,加快城乡配网改造,进一步降低和控制线损率。随着城乡配网改造与新建工程的实施,越来越多的动态无功补偿装置应用到配网中,配网运行方式日趋复杂多样化,因此难以采用一些传统的线损计算方法^[3-4],如等值电阻法等准确计算其线损^[5]。

加强线损管理必然要求更加精确地计算配电网的理论线损及其在网络中的分布,为配电网的安全经济运行提供参考。目前关于配电网的理论线损计算多是假设各个配电变压器的功率因数、典型日负荷曲线相同^[6-7],但是在配网实际运行中由于负荷的

差异性很大,如果不计及这些因素的影响将会带来很大的误差,因此本文的算法中考虑了不同变压器间负荷特性的差异。随着无功补偿电容器的大量投运,这些电容器大多是可以根据电网的运行状态实时投切的,显然传统的计算方法由于没有考虑无功等其它缺陷而不能适应现代配电网的发展^[8-9],因此本文提出的中压配电网计及实时投切电容器的理论线损计算方法,根据配电网的实际情况和网络具体特点,具体考虑到电容器在运行时间内每个时刻的投切状态,结合现有的配网理论线损计算方法用于配电网的线损计算,从而提高了计算精度,提供科学的计算结果。

随着电力系统负荷的增加,对无功功率的需求也日益增加。无功功率在电网中传输会造成网络损耗以及受电端电压下降,使电能利用率大大降低且

严重影响供电质量。因此, 在电网中的适当位置装设无功补偿装置是满足电网无功需求的必要手段, 无功补偿装置的投资已被列入电力投资的整体规划中, 成为一个不可缺少的环节, 目前中压动态无功补偿技术已趋于成熟, 并在配电网中得到了广泛应用^[10], 将会有越来越多的无功补偿电容器应用到现代配电网中。因此配网理论线损计算方法也应该相应地跟的上配电网的发展, 研究计及动态无功补偿电容器的配网理论先算计算方法亟待需求。

1 动态无功补偿电容器

动态无功补偿电容器的总容量由固定容量和可变容量两部分组成, 可以根据配电网运行状态实时改变其可变容量的投切, 在一条馈线中一般投入一台或两台电容器, 其投入运行容量为:

$$Q_{ci} = Q_{gdi} + K_{ci} Q_{kbi} \quad (1)$$

式中: Q_{gdi} 为第 i 个电容器的固定容量; Q_{kbi} 为第 i 个电容器的可变容量; K_{ci} 为第 i 个电容器可变容量的系数 (为 0、1 变量, 在可变容量投入状态下为 1, 未投入状态下为 0); Q_{ci} 为第 i 个电容器的投运容量。

在一天当中, 电容器的投运容量是动态变化的, 如图 1 所示。

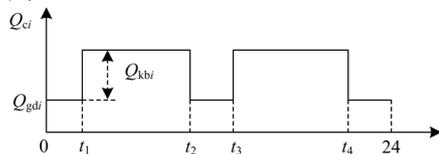


图1 电容器投运容量变化示意图

Fig.1 The change of capacitor's capacity

在不考虑补偿电容器动态投切的理论线损计算中, 通常把一天内的数据按照 24 个小时分配即 24 个单元来计算^[7], 而现在加入了动态无功补偿电容

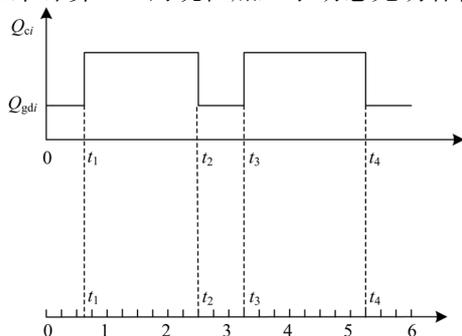


图2 计算时段的再次划分

Fig.2 Calculation of time divided again

器, 电容器的“投切”动作不一定发生在整点时刻, 因此如果在一个整点内有“投切”动作那么在该整点内馈线上无功功率的分布有很大的变化, 则把该时段划分为两个或两个以上的计算单元来考虑, 这样计算一天内理论线损则把该天划分为大于 24 的单元来计算, 如图 2 所示。

图 2 中的理论线损计算时段应该划分为: $0-t_1, t_1-1, 1-2, 2-t_2, t_2-3, 3-4, \dots$ 。

2 配网理论线损计算的数学模型

2.1 馈线出口处每小时负荷功率的确定

变电站每条馈线出口处都有电压、电流表和有功、无功电能表, 通常电能表的准确度要高于电压、电流表, 故选择代表日的有功、无功电度数作为分摊的基础。

$$p_{st} = k_{st} p_s \quad (2)$$

$$Q_{st} = k_{st} Q_s \quad (3)$$

式中: $k_{st} = \frac{U_{st} I_{st}}{\sum_{i=1}^{24} U_{st} I_{st}}$ 为馈线出口处第 t 小时的功

率分配系数; P_s, Q_s 为馈线出口处代表日的有功、无功电度数; P_{st}, Q_{st} 为馈线出口处代表日第 t 小时的有功、无功功率; U_{st}, I_{st} 为馈线出口处代表日第 t 小时的电压和电流。

2.2 小电源节点每小时负荷功率的确定

在配电网中经常有小电源节点 (小水电和小火电) 存在, 在其接入配电网处也有电压、电流表和电度表记录运行数据。其每小时的有功和无功负荷功率分别按式(4)、式(5)计算:

$$p_{ht} = k_{ht} p_h \quad (4)$$

$$Q_{ht} = k_{ht} Q_h \quad (5)$$

式中: 参数的意义参考式 (2)、(3) 中各个参数的意义。

2.3 配变节点高压侧每小时负荷功率的确定

现有常用的处理方法是假设这些配变的负荷功率因数、日负荷曲线形状相同, 但是由于在配网的实际运行中各配电变压器所担负的负荷性质有很大的差异, 则为了保证计算的精确性, 则应该充分考虑各不同性质负荷曲线的差异, 这时可按下式计算配电变压器 i 高压侧在第 t 个时段内的有功、无功负荷功率:

$$P_{it} = K_{pit} (P_{st} + \sum_{h=1}^{N_h} P_{ht}) \quad (6)$$

$$Q_{it} = K_{Qit} (Q_{st} + \sum_{h=1}^{N_h} Q_{ht} + \sum_{k=1}^{N_c} Q_{ckt}) \quad (7)$$

式中： $K_{pit} = \frac{S_{Ni} \cdot L_{pi(t)} \cdot \cos \varphi_i(t)}{\sum_{i=1}^{N_t} S_{Ni} \cdot L_{pi(t)} \cdot \cos \varphi_i(t)}$ 为配电变压器

器 i 的有功功率分配系数； $L_{pi(t)}$ 为有功典型负荷曲线中以最高负荷为基准的标么值； $\cos \varphi_i(t)$ 为功率

因数； $K_{Qit} = \frac{S_{Ni} \cdot L_{Qi(t)} \cdot \sin \varphi_i(t)}{\sum_{i=1}^{N_t} S_{Ni} \cdot L_{Qi(t)} \cdot \sin \varphi_i(t)}$ 为配电变压器

i 的无功功率分配系数； $L_{Qi(t)}$ 为无功典型负荷曲线中以最高负荷为基准的标么值； Q_{ckt} 为馈线安装的第 k 个无功补偿电容器在第 t 个时段内的投运容量； N_t, N_h, N_c 为配电变压器、小电源和补偿电容器个数； S_{Ni} 为配电变压器 i 的额定容量。

2.4 节点电压的计算

配电网中节点 i, j 之间的电压可用下式计算：

$$U_{ij} = \frac{P_{ij} R_1 + Q_{ij} X_1}{U_i} \times 10^{-3} \quad (8)$$

式中： P_{ij}, Q_{ij} 为支路 ij 首端（有功正向为 i 由流到 j ）的有功、无功潮流； R_1, X_1 为线路 l 的电阻、电抗； U_i 为线路首端节点 i 的电压。

线路末端节点 j 的电压为：

$$U_j = U_i - U_{ij} \quad (9)$$

2.5 线路和配电变压器功率损耗的计算

2.5.1 线路损耗功率

一条线段在一个时段内的损耗功率：

$$\Delta P_i = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_j^2} R_1 \quad (10)$$

$$\Delta Q_i = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_j^2} X_1 \quad (11)$$

式中： $\Delta P_i, \Delta Q_i$ 为支路 ij 的有功、无功损耗功率。

整个馈线在一天的损耗有功、无功电量：

$$A_p = \sum_{t=1}^L \sum_{i=1}^N \Delta P_{it} \quad (12)$$

$$A_Q = \sum_{t=1}^L \sum_{i=1}^N \Delta Q_{it} \quad (13)$$

式中： $\Delta P_{it}, \Delta Q_{it}$ 为第 i 条线段在第 t 个时段内的

损耗有功、无功功率； L, N 为一天内划分的时间段个数、支路数。

2.5.2 配电变压器损耗功率

变压器损耗分为铜耗和铁耗。铜耗是可变损耗（与设备通过的电流有关）、铁耗是不变损耗（与设备上所加的电压有关）。可变损耗的算式如下：

$$\Delta P_{kt} = P_k \frac{P_{it}^2}{S_N^2} \quad (14)$$

式中： P_k 为变压器短路损耗。

而变压器的铁耗即为配变的空载损耗 P_0 ，故变压器在一天的总损耗为：

$$\Delta A_T = \sum_{t=1}^L \Delta P_{kt} + P_0 \times 24 \quad (15)$$

3 程序流程图

根据前面部分所详细介绍的理论线损计算公式及方法，利用图 3 中的程序流程图即可成功编制出中压配网计及动态无功补偿电容器的理论线损计算程序。

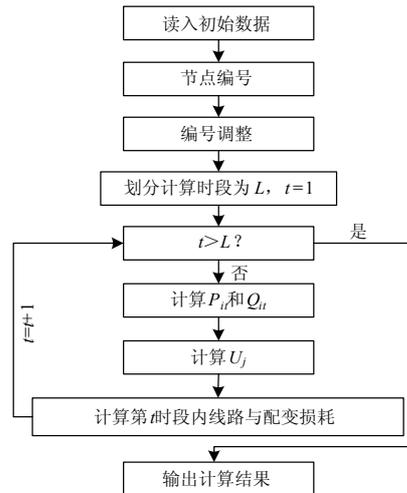


图 3 线损计算流程图

Fig.3 Line loss calculation flow diagram

4 计算实例

本文以实际中的某一条配电线路的线损计算为例，如图 4 所示，其线路的网络结构及其参数已经标注在图中（各变压器的额定电压为 10 kV）。

取一典型日的运行参数： $P_s=14600 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ， $Q_s=7803 \text{ kvar} \cdot \text{h}$ ，配电线路首端处电压、电流数据如表 1 所示，电容器的“投切”动作时刻如表 2 所示。

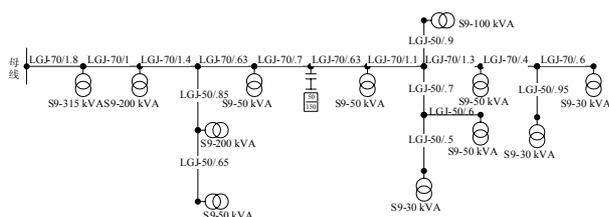


图 4 配电线路结构图

Fig.4 Structure of the distribution line

表 1 配电线路首端电压、电流数据

Tab.1 Voltage and current in the beginning of distribution line

时刻	电压 / kV	电流 / A	时刻	电压 / kV	电流 / A
1~12 时	10.5	18.15	13~24 时	10.7	32.38
	10.3	18.69		10.6	27.23
	10.5	18.96		10.6	31.77
	10.6	18.07		10.7	39.57
	10.7	18.17		10.0	41.96
	10.2	24.53		9.8	43.60
	10.3	27.09		9.9	42.18
	10.3	37.37		10.1	41.35
	10.4	41.64		10.6	50.84
	10.4	42.56		10.5	39.96
	10.5	45.82		10.4	37.01
	10.5	43.07		10.3	31.76

表 2 电容器的“投切”动作时刻

Tab.2 Action time of the capacitor's switch

时刻	投/切	时刻	投/切	时刻	投/切
0:00	投	7:10	切	19:10	投
1:00	切	9:10	投	20:20	切
1:30	投	10:50	切	21:10	投
2:40	切	12:15	投	22:40	切
3:20	投	14:20	切	23:00	投
4:10	切	16:30	投		
5:50	投	18:00	切		

根据公式 (15) 计算一天中总损耗为 555.5 kW·h, 线损率为 3.8%, 在表 3 中可以看到经过此理论线损计算方法所计算的本条馈线在一天内各个时段内的有功功率损耗, 与以前的线损计算只能统计地给出线路总损耗相比, 本方法根据动态无功补偿电容器的“投切”状态对配网的各个运行时段进行计算, 这样不仅计算更为精确, 而且能够分时刻分析线损, 评价无功补偿是否合理, 为进一步的无功优化提供可靠依据。

表 3 理论线损计算结果

Tab.3 Results of theoretical line loss calculation

时刻	线损 / kW	时刻	线损 / kW	时刻	线损 / kW
0:00	19.00	7:10	29.00	16:00	20.13
1:00	13.98	8:00	28.33	16:30	20.60
1:30	14.55	9:00	37.04	17:00	20.95
2:00	15.63	9:10	38.80	18:00	21.77
2:40	15.45	10:00	39.61	19:00	23.00
3:00	15.24	10:50	40.20	19:10	23.95
3:20	16.32	11:00	41.16	20:00	23.90
4:00	17.60	12:00	42.70	20:20	22.50
4:10	18.92	12:15	40.30	21:00	22.00
5:00	21.00	13:00	39.41	21:10	21.80
5:50	21.30	14:00	33.36	22:00	21.50
6:00	21.50	14:20	30.00	22:40	20.30
7:00	22.00	15:00	28.68	23:00	20.00

5 总结

本文对包含动态无功补偿电容器的配电线路理论线损计算方法进行了论述, 并以实例加以计算。此种方法弥补了传统方法中不考虑补偿电容器, 或是考虑电容器但并无法计其补偿容量的动态变化这一客观事实的线损计算的缺陷。随着配电网的发展, 必定会有越来越先进的技术应用到配电网中, 因此对于配网各种计算模型都要求其不断改进创新, 本文解决的问题就是其中很重要的一个方面。

参考文献

- [1] 姜惠兰, 刘文良, 孟庆强, 等. 配电网线损计算径向基函数神经网络方法[J]. 自动化学报, 2007, 33 (3): 334-336.
JIANG Hui-lan, LIU Wen-liang, MENG Qing-qiang, et al. RBFNN Method of Calculating Energy Losses of Power Distribution Systems[J]. Aata Automatica Sinica, 2007, 33 (3): 334-336.
- [2] 郭晓君. 回归分析法在线损计算中的应用[J]. 继电器, 2002, 30 (8): 50-51, 54.
GUO Xiao-jun. The Application of Regressive Analysis in Line-loss Calculation[J]. Relay, 2002, 30(8): 50-51, 54.
- [3] 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.
YANG Xiu-tai. Calculation and Analysis on Energy Losses Theory in Power Systems[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.
- [4] 许绍良, 宋冶, 苗竹梅. 电力网电能损耗计算导则[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

(下转第 140 页 continued on page 140)

重要技术依据和经验。一般说来，直流寄生回路的类型归纳起来主要有以下几种情况：

- 1) 绝缘监测装置因元器件问题，装置内部存在寄生；
- 2) 蓄电池检测小线绝缘不良引起寄生；
- 3) 外部二次回路接线有误所导致的寄生，如厂家操作箱背板线接错；
- 4) 闪光回路 I、II 段母线存在寄生、信号回路内部存在寄生等；
- 5) 自动化直流电源原理接线存在缺陷所引起的寄生；
- 6) 硅整流内部合母 I、II 段直连。

总之，由于站内直流系统的特殊性，要消除直流寄生，必须要有完备的组织措施和技术措施，及较高的人员技能，还有周密的生产计划，在将安全生产始终放在首位的同时，才能确保在试拉过程中其他设备能安全稳定运行，另外也要强调源头管理，只有将隐患消除在设备安装调试初期，这样才能对提高本地区电网的运行可靠性有重要意义。

参考文献

[1] 吴伯华. 变电所二次设备的接地技术 [J]. 中国电力, 1996, 29 (3): 57-60.

(上接第 95 页 continued from page 95)

XU Shao-liang, SONG Ye, MIAO Zhu-mei. Principle of Power Grid Energy Loss Calculation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.

[5] 袁慧梅, 郭喜庆, 于海波. 中压配电网线损计算新方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (11): 50-53.

YUAN Hui-mei, GUO Xi-qing, YU Hai-bo. New Method for Calculating Energy Losses in Medium-Voltage Distribution Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (11): 50-53.

[6] 朱发国. 基于现场监测终端的配电网线损计算[J]. 电网技术, 2001, 25 (5): 38-40.

ZHU Fa-guo. Loss Calculation Method for Distribution Network with Information from Field Terminal Using[J]. Power System Technology, 2001, 25 (5): 38-40.

[7] 丁心海, 罗毅芳, 刘巍, 等. 配电网线损理论计算的实用方法—改进迭代法[J]. 电网技术, 2000, 24 (1): 39-42.

DING Xin-hai, LUO Yi-fang, LIU Wei, et al. A New Practical Method for Calculating Line Loss of Distribution Network-improved Iteration Method[J]. Power System Technology, 2000, 24 (1): 39-42.

[8] 文福拴, 韩祯祥. 基于分群算法和人工神经网络的配电网线损计算[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13 (3): 41-50.

WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang. Calculation of Energy Losses in Distribution Systems Based on Division

WU Bo-hua. Substation Secondary Equipment Grounding Techniques[J]. Electric Power, 1996,29(3): 57-60.

[2] 景胜. 我国微机保护的现状与发展 [J]. 继电器, 2001, 29 (10): 1-4.

JING Sheng. Development and Current Situation of Microcomputer Protection[J]. Relay, 2001, 29 (10): 1-4.

[3] 杨书文. 变电站直流系统接地故障分析与查找[J]. 湖北电力, 2008, 32 (1): 17-22.

YANG Shu-wen. Fault Analysis and Lookup of Substation DC System Grounding[J]. Hubei Electric Power, 2008, 32 (1): 17-22.

[4] 李冬辉, 周巍巍. 基于 ARM 微处理器的直流系统接地故障检测装置的设计与实现[J]. 低压电器, 2005, 22 (2): 55-56.

LI Dong-hui, ZHOU Wei-wei. Design and Implement of DC System Grounding Fault Detecting Device Based on ARM[J]. Low Voltage Apparatus, 2005, 22 (2): 55-56.

收稿日期: 2009-04-26; 修回日期: 2009-07-09

作者简介:

袁 成 (1969-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事变电站运行与技术管理工作; E-mail: yuancheng@sh163.net

孙银权 (1965-), 男, 工程师, 大学, 主要从事变电站直流维护管理工作;

雷仲强 (1966-), 男, 工程师, 大学, 主要从事变电站继保维护管理工作。

Arithmetic and ANN[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13 (3): 41-50.

[9] 张铁峰, 苑津莎, 刘建新. 计及多种因素的配电网理论线损实用计算方法[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32 (3): 5-8.

ZHANG Tie-feng, YUAN Jin-sha, LIU Jian-xin. Practical Method in Consideration of Multifactor for Calculating Line-loss of Distribution Network[J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 32 (3): 5-8.

[10] 任丕德, 刘发友, 周胜军. 动态无功补偿技术的应用现状[J]. 电网技术, 2004, 28 (23): 81-83.

REN Pei-de, LIU Fa-you, ZHOU Sheng-jun. The Application Situation of Dynamic Reactive-power Compensation Technology[J]. Power System Technology, 2004, 28 (23): 81-83(in Chinese).

收稿日期: 2009-04-07; 修回日期: 2009-06-10

作者简介:

刘甲庆 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网规划与运行控制; E-mail: zdjiaqing@sina.com

张 皓 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与分析;

章 健 (1963-), 男, 教授, 研究方向为电力系统运行与分析。