

计及配变无载调压分头位置的电压/无功优化方法

夏继红, 牛焕娜, 杨明皓*

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 结合中国 10 kV 配电系统结构和运行特征, 提出了计及配电变压器无载调压分头位置的配电线路无功运行优化数学模型。根据配电变压器分接头位置只能在特定时期无载调节的特点, 将实际配电负荷等值为多时段动态负荷。由该优化模型可以求得能够适应各时段负荷变化的最佳变压器分头位置和各时段最佳无功补偿容量及运行电压。介绍了采用遗传算法求解以网损最小为目标的该优化模型的主要步骤和处理方法, 用实际 10 kV 配电线路的仿真计算验证了在电压/无功优化模型中计及无载调压分头位置优化必要性和可行性。

关键词: 配电网; 经济运行; 电压/无功优化; 降低线损

中图分类号: TM714

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-8-0118-05

夏继红, 牛焕娜, 杨明皓. 计及配变无载调压分头位置的电压/无功优化方法[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 118-122.
Xia Jihong, Niu Huanna, Yang Minghao. Voltage and reactive power optimization algorithm incorporating off-load tap changer transformer in distribution systems[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 118-122.(in Chinese with English abstract)

0 引言

10 kV 配电网无功优化技术作为电网降损节能的重要手段长期以来受到学者^[1-7]和电力企业^[8]极大的重视。目前中国 10 kV 配电网电压无功的控制手段主要是配电变压器低压侧电容器投切控制和变电站有载调压变压器对 10 kV 出线首端电压的调节控制。

在生产实际中配电变压器分接头位置通常是凭经验一次设定, 然而, 当分接头位置设置不合理时, 将影响已经安装的补偿设备发挥应有的降损节能作用, 主要表现在: 1) 线路轻载且负荷功率因数较低时, 由于配电变压器低压侧电压过高, 补偿电容器不能动作。线路的无功缺失得不到补偿, 增加了线路的损耗。2) 线路轻载时, 变压器铁损占主要部分, 如果通过降低运行电压来降低网络损耗, 将致使某些节点不能满足电压合格要求, 限制了运行电压调整的范围, 从而限制了损耗的降低。3) 线路重载时配电变压器低压侧电压偏低, 不能满足电压合格的要求, 这种情况可以通过改变某些配变分接头位置得到缓解。

为了充分利用已经投入的无功补偿设备, 进一步降低线路的网络损耗, 本文提出了考虑配变无载调压分接头位置的配电网电压/无功优化方法。运行部门可以根据分接头的优化位置, 在必要的情况下按月或季(这里称规划期)对无载调压分接头位置进行调整。

从数学上来看, 配电网电压/无功优化是一个非线性、

混合整数、时空动态优化问题。本文采用遗传算法求解该优化问题, 可以求得能够适应每个时段负荷的最佳线路首端运行电压和最佳无功补偿容量以及能够适应各时段负荷变化的最佳配电变压器分接头位置。并用实际 10 kV 配电线路的优化计算和仿真实验验证在电压/无功优化模型中计及无载调压分接头位置优化必要性和可行性。

1 数学模型

1.1 时变配电负荷模型

为了减少计算量, 本文对时变配电负荷做两步简化。

简化 1: 以规划期内的各负荷节点的日平均整点有功和无功负荷曲线为无功优化问题的扰动变量, 即以平均日无功优化控制决策作为整个规划期的优化决策。

简化 2: 按照文献[9]提出的配电负荷分段等值的方法, 将每个负荷节点 24 小时变化的负荷曲线等值为 S 段(称为时段), 并且每一时段的起止时刻都相同。

1.2 状态变量和控制变量

配电网无功优化问题的状态变量为除首端节点以外所有节点的电压和相角。

计及配变无载调压分头位置的无功优化问题的控制决策变量有两类: 一类是各时段随负荷变化而变化的时变决策变量, 另一类是在规划期内时不变的决策变量。

1) 时变决策向量

显然, 装有无功补偿电容器组的负荷节点的无功补偿量是时变决策变量, m 个无功补偿节点、 S 个时段形成的无功补偿容量决策矩阵向量为

$$Q_c = [Q_{c(i,j)}]_{S \times m} \quad (1)$$

式中 i ——时段序号; j ——无功补偿点顺序号。

配电线路首节点电压可以由变电站内有载调压变压器和站内补偿电容器通过 VQC 来控制, 并且该决策变量

收稿时间: 2007-09-11 修订时间: 2008-07-15

基金项目: 国家科技支撑计划 (2006BAJ04B06)

作者简介: 夏继红 (1983-), 女, 安徽人, 主要从事配电网自动化方面的研究。北京市海淀区清华东路 17 号 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。Email: xiajihong83@163.com

*通讯作者: 杨明皓, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统及自动化技术。北京市海淀区清华东路 17 号 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。

是时变的。设首节点号为 1，有

$$\mathbf{U}_1 = [U_{1(1)}, U_{1(2)}, \dots, U_{1(S)}]^T \quad (2)$$

这里没有取首端有载调压分头位置作为控制变量^{[3][7]}，是因为变电站母线电压调整不能由一回出线决定，这里向量 \mathbf{U}_1 既是配电线路无功优化决策阶段的终值，也是下阶段变电站范围内无功优化的初值。

2) 时不变决策向量

每一个负荷节点对应配电变压器的无载调压分头在整个规划期内需要确定一个最佳位置，因此 n 个负荷节点的分头位置对应了 n 个时不变的决策变量 K_i ($i=1, 2, \dots, n$)，组成分头位置决策向量

$$\mathbf{K} = [K_1, \dots, K_n] \quad (3)$$

1.3 目标函数

配电变压器分头位置按规划期控制，随器无功补偿容量和首端电压按时段控制，目标函数为规划期总有功网损电量最小。

$$\min F = \sum_{i=1}^S [P_{\text{loss}(i)}(\mathbf{Q}_{C_i}, U_{1(i)}, \mathbf{K}) \times T_i] \quad (4)$$

式中 S —— 负荷分段的时段数； T_i —— 第 i 时段的持续时间， h ； $P_{\text{loss}(i)}$ —— 第 i 时段系统总网损，它是配变分头位置向量 \mathbf{K} 、第 i 时段线路和首端电压 $U_{1(i)}$ 和第 i 时段补偿无功容量向量 \mathbf{Q}_{C_i} 的函数， \mathbf{Q}_{C_i} 为式 (1) 矩阵的第 i 行向量。

1.4 约束条件

1) 等式约束

$$\mathbf{A}i = \mathbf{I} \quad (5)$$

式中 \mathbf{A} —— 节点关联矩阵； i —— 配电网所有支路的电流； \mathbf{I} —— 配电网所有节点的注入电流。

2) 不等式约束

节点电压约束

$$\mathbf{U}_{\min} \leq \mathbf{U}_i \leq \mathbf{U}_{\max} \quad (6)$$

式中 \mathbf{U}_i —— 第 i 时段节点电压向量； \mathbf{U}_{\min} 和 \mathbf{U}_{\max} —— 分别为相应的节点电压下限和上限向量。

补偿设备的补偿容量约束：

$$\mathbf{Q}_{c(j)\min} \leq \mathbf{Q}_{c(i,j)} \leq \mathbf{Q}_{c(j)\max} \quad j \in \pi_m \quad (7)$$

式中 $\mathbf{Q}_{c(i,j)}$ —— 第 i 时段第 j 个补偿节点的补偿控制容量， kvar ； $\mathbf{Q}_{c(j)\min}$ 和 $\mathbf{Q}_{c(j)\max}$ —— 分别为第 j 个节点补偿容量的下限和上限； π_m —— 无功补偿节点集合。

无载调压分头位置上下限约束：

$$\mathbf{K}_{j\min} \leq \mathbf{K}_j \leq \mathbf{K}_{j\max} \quad \mathbf{K}_j \in \mathbf{K} \quad (8)$$

式中 \mathbf{K}_j —— 第 j 台变压器分接头档位； $\mathbf{K}_{j\min}$ 及 $\mathbf{K}_{j\max}$ —— 相应变压器分接头档位上下限。

2 计算方法

由式 (4) ~ 式 (8) 组成的配电网电压/无功优化模型是一个复杂的非线性规划问题，既非动态模型又非单时段单静态模型。用遗传算法对所有阶段的负荷进行优化计算，最后获得有功电能损耗最小的方案。

2.1 改进遗传算法

遗传算法主要包括以下基本步骤：

1) 编码：本文采用十进制整数编码。

电容器按组逐级投切，编码公式如下：

$$\begin{aligned} Q_{C_i} &= C_i k_{C_i} \\ C_i &\in \{0, 1, \dots, N_{C_i}\} \end{aligned} \quad (9)$$

式中 N_{C_i} —— 安装在配变 i 的电容器组数； k_{C_i} —— 单组容量。

首端电压范围设定为 $[9.5, 10.5]$ ，变化间隔为 δ_U 。

编码公式如下：

$$\begin{aligned} U_{1i} &= 9.5 + \delta_U \times k_{U_i} \\ k_{U_i} &\in \left\{ 0, 1, \dots, \frac{10.5 - 9.5}{\delta_U} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

配电变压器无载调压分头位置编码根据档位与变比之间的对应关系，直接取相应档位的变比。

2) 适应度函数 F ：包括有功电能损耗和电压越限的惩罚项。

$$f_{V_i} = W_i + \sum_{j=1}^n (\beta \times \Delta U_{L_{ij}}) \quad (11)$$

式中 W_i —— 有功能量损耗； β —— 罚系数； $\Delta U_{L_{ij}}$ —— j 配变低压侧电压越限的模值； n —— 节点数。

3) 选择、交叉、变异

对适应度个体进行排序，选择适应度较高的 $\text{popsize}/2$ 个个体进行简单交叉操作。交叉概率 p_c 随着遗传代数 g 的增加而减少。

$$p_c = \frac{p_{c\max}}{1 + g / g_{\max}} \quad (12)$$

变异概率 p'_m 随着适应度的减小而增大。

$$p'_m = p_m \times (1 + e^{-\alpha}) \quad (13)$$

其中适应度越小 α 越小，变异概率越大。

4) 终止进化判据

达到预定的最大进化代数或最优个体的保持代数时，停止优化。

2.2 调整策略

由于对每个控制变量的编码是在其控制范围内按均匀分布随机取值，会使群体中存在大量的不可行个体。若不对这些个体提前加以改进而让其直接进入遗传操作，会增加算法在非解域空间（不可行解域）的无谓搜索时间，减弱了算法的收敛性。因此需要对不可行个体进行调整。由于电压和无功的关系有很强的区域性，对于存在电压越限的节点，应尽量调节本节点相连的无功补偿设备和变压器分头位置进行电压/无功的平衡调整。调整策略如表 1。

遗传操作产生的新个体中，某些配变分头位置各阶段的取值不同，须要调整成 1 个不变的档位。对分头位置调整决策为：以个体中各配变分头位置出现在某个档位的概率作为决策依据，将概率最大的档位作为决策档位。若档位决策后仍为不可行个体，按照表 2 进行调整，该调整只进行无功调整不再进行分头调整。

表 1 电压/补偿电容调整策略
Table 1 Voltage/capacitor control strategy

电 压		高压侧		
		U+	U	U-
低 压 侧	U+	C-n	C-n/T-n	T-n
	U	T+n	合格	C+n/T-n
	U-	T+n/C-n	C+n/T+n	C+n

表 2 补偿电容调整策略
Table 2 Capacitor control strategy

电压		高压侧		
		U+	U	U-
低 压 侧	U+	C-n	C-n	放弃
	U	放弃	合格	C+n
	U-	C-n	C+n	C+n

表 1、表 2 中，U+、U、U- 分别表示电压越上限、电压合格、电压越下限，C+n 表示投入该节点所带的 n 组电容器，C-n 表示切除该节点所带的 n 组电容器，T+n 表示上调该节点变压器分头位置，T-n 表示下调该节点变压器分头位置，C-n/T-n、T+n/C-n、C+n/T-n、C+n/T+n 分别表示当前的一种策略没有调节能力时，采用后一种策略。

3 实例与分析

3.1 系统原始资料及时序负荷处理

本文取某条 10 kV 线路实际配电线路作为算例，进行了无功优化计算和仿真研究，该线路的拓扑如图 1。共有 24 条支路，19 台配变。配电变压器高压侧电压允许范围为[9.5 kV, 10.5 kV]，低压侧电压允许范围为[220 V, 242 V]。所有配变为无载调压变压器，调整档位有 3 档：① 10.5/0.4、② 10/0.4、③ 9.5/0.4。系统所有配电变压器无载调节分头原始档位均为②档。系统中无功补偿电容器组安装节点及容量见表 3。

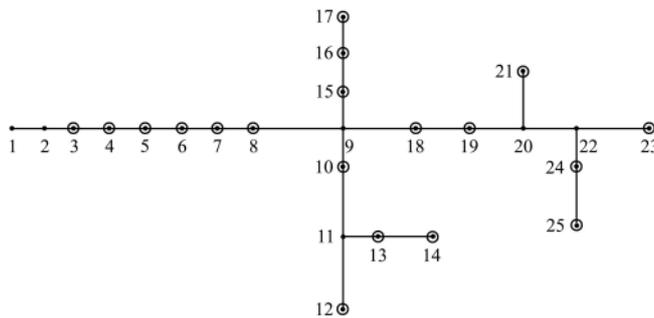


图 1 系统拓扑图
Fig.1 Diagram of distribution system

表 3 电容器配置表

Table 3 Capacitor data of system

节点号	组数	补偿容量/kvar
5	20	200
14	20	200
19	10	100
10	20	200
17	20	200

系统的总负荷曲线见图 2 所示。本文采用 1.1 节中的负荷处理方法将对所有节点的时序负荷进行分段处理，共分 6 阶段，各段的起始和终止时间在表 4 中列出。

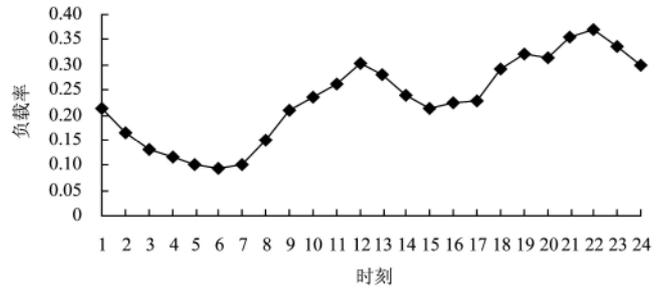


图 2 系统负荷曲线
Fig.2 Daily load curve of system

表 4 系统负荷曲线分段结果
Table 4 Result of daily load

段号	开始时间	结束时间	等值负载率
1	01:00	03:00	0.17
2	04:00	07:00	0.1025
3	08:00	09:00	0.1788
4	10:00	14:00	0.2650
5	15:00	17:00	0.2213
6	18:00	24:00	0.3263

3.2 无功优化结果

本文采用遗传算法对 2.2 节的配电网电压/无功优化模型求解结果如下：

1) 分头位置优化决策向量 K

初始网络中所有配变的位置均在②档，经优化后，决策向量 K 中有变化配变及档位列于表 5，未列出的配变档位仍为②档。

表 5 配变档位优化结果

Table 5 Result of optimal tap ratios of transformer

节点	优化前档位	优化后档位
23	②	③
24	②	③
25	②	③

2) 无功补偿容量优化决策向量 Qc

各补偿点在各阶段的补偿容量优化决策向量 Qc，见表 6。

表 6 电容器补偿优化结果

Table 6 Result of optimal capacitor

阶段	投入电容容量/kvar	节点				
		5	10	14	17	19
阶 段	1	50	60	60	60	40
	2	50	60	70	70	40
	3	50	60	70	70	40
	4	80	90	90	90	60
	5	70	80	80	80	50
	6	90	110	110	110	70

3) 首端电压的优化决策向量 U_1

线路首节点运行电压优化决策结果见表 7。

表 7 线路运行电压优化结果
Table 7 Result of optimal running voltage

运行电压/kV						
段号	1	2	3	4	5	6
电压	9.7	9.6	9.7	9.7	9.7	10

4) 网络损耗

该线路在给定负荷条件，未进行电压无功优化的情况下，规划期内的能量损耗为 12421.74 kW·h。本文优化控制方案在相同负荷条件下的能量损耗为 10339.53 kW·h。电能损耗降低 16.8%。

综上，可以看出，经优化后在保证电压质量的情况下，能大大降低网络的能量损耗。

3.3 仿真试验

为了进一步验证配电线路无功优化计及无有载调压分头的必要性，本文对该试验系统在原始负荷条件下 (24 h)，分别对以下三种控制策略做了仿真计算：仅低压无功补偿优化控制^[7]、不计配变无载分头位置的电压/无功优化控制^[5]、计及配变无载分头位置的电压/无功优化控制 (本文方法)。

1) 系统能量损耗对比

图 3 为本文方法与仅低压无功补偿优化控制相比，在各整点时刻所降低的能量损耗，规划期内共降低损耗 526.29 kW·h，电能损耗降低了 5%。

图 4 为本文控制方案与不计配变分头位置优化控制方案相比，在各整点时刻所降低的能量损耗，共降低损耗 25.64kW.h 电能损耗降低了 0.25%。

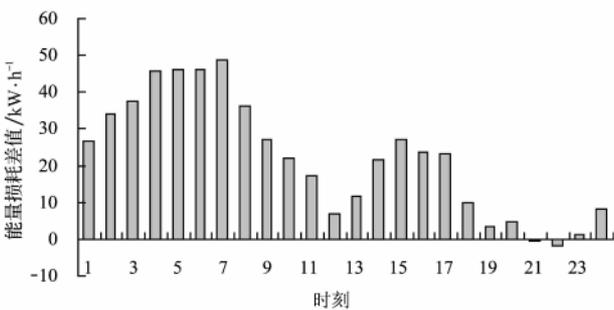


图 3 仅无功优化与本文方案的能量损耗差
Fig.3 Active power loss difference under only reactive power optimization and the paper optimization

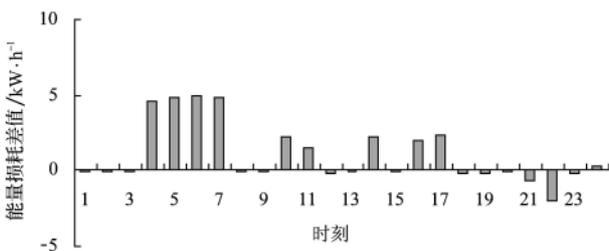


图 4 电压/无功优化与本文方案的能量损耗差
Fig.4 Active power loss difference under voltage/reactive power optimization and the paper optimization

2) 首端电压对比

图 5 为三种控制策略下线路首端电压曲线。仅低压无功优化方案运行电压始终保持在 10.5 kV。不计配变无载调压分头位置的电压/无功优化方案的最低运行电压为 9.7 kV、占时 42%，最高运行电压为 10.5 kV，发生在负荷最重的 21 点和 22 点，占时 8%。计及配变无载调压分头位置的电压/无功优化方案的最低运行电压为 9.6 kV，发生在负荷最轻的 4 点到 7 点，最高电压 10.2kV 发生在 21 点和 22 点。

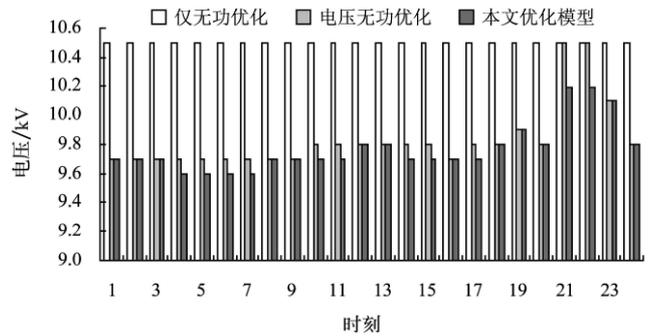


图 5 运行电压对比结果
Fig.5 Voltage difference

3) 仿真结果分析

配电系统的损耗主要由系统元件电阻引起的有功损耗 (简称电阻损耗) 和配电变压器的空载损耗组成。由图 2 系统负荷曲线可以看出，系统总体负荷水平较低，全天用电最低谷时段是 4 点到 7 点，高峰时 21 点到 22 点。由图 3 和图 5 可见在轻载时段降低系统运行电压后，可以在低压无功优化补偿的基础上进一步降低损耗。本文方法通过改变线路末端无载调压分头位置来保证用户电压水平，运行电压可以进一步降低，因此网损也进一步降低，如图 4 中 4 点到 7 点、10 点、11 点、14 点、16 至 17 点。这是因为降低运行电压使得所有配电变压器的空载损耗降低了。在 21 点和 22 点重载时段提高系统运行电压可以减小电流从而降低系统元件的电阻损耗，但是由于无载调压分头位置在③档的节点限制了系统电压能够上升的高度，以此在这两个时段，本文的方案比前两种方案的损耗有所上升，但是全日总损耗是最小的。同样地，不难验证对总体重载的配电系统中通过改变无载调压分头位置 (档位①) 可以提高系统运行电压，达到进一步降低网损的目的。

4 结 论

特别对于农村配电网，由于用电负荷的季节性较强，配电变压器无载调压分头的季节性调整可进一步降低配电系统能量损耗。通过无载调压分头位置的设定来保证低压侧用户电压水平，实现在负荷重的季节提高系统的运行电压降低电阻损耗，在轻载时降低运行电压来降低配电变压器的空载损耗。本文用提出的计及配电变压器无载调压分头位置的配电线路电压/无功优化模型和方法对实际配电网所作的仿真研究验证了此结论的可行性和实用性。

[参 考 文 献]

- [1] Hus H Y, Kuo H C. Dispatch of capacitors on distribution system using dynamic programming[J]. IEE PROCEEDINGS-C, 1993, 140(6): 433-438.
- [2] Li Fengchang, Hsu Yuanyih. Fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(2): 681-688.
- [3] 张 鹏, 刘玉田. 配电系统电压控制和无功优化的简化动态规划法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(4): 49-53.
- [4] 邓佑满, 张伯明, 田 田. 虚拟负荷法及其在配电网动态优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1996, 7(16): 241-244.
- [5] 胡泽春, 王锡凡. 配电网无功优化的分时段控制策略[J]. 电力系统自动化, 2002, 3: 45-49.
- [6] 任晓娟, 邓佑满, 赵长城, 等. 高中压配电网动态无功优化算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 31-36.
- [7] 方 兴, 郭志忠. 配电网时变综合优化方法研究[J]. 电力系统自动化, 2006, 21(9): 31-36.
- [8] 牛焕娜. 北京 10 kV 线路低压无功补偿装置运行状况调研报告[Z]. 2005 年 10 月, 北京电力电子有限公司.
- [9] 耿光飞. 地区电网无功优化控制的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.

Voltage and reactive power optimization algorithm incorporating off-load tap changer transformer in distribution systems

Xia Jihong, Niu Huanna, Yang Minghao^{*}

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Combining the 10 kV distribution system structure and operational feature, a voltage and reactive power optimization model incorporating no-load variable transformer in distribution systems is proposed. According to the tap ratios of off-load tap changer transformer can be adjusted in special time, the actual load are equal to multi-stage dynamic load. This model can provide the optimal tap ratios of transformers adapting the whole segment, optimal capacitance and running voltage in several segments. Genetic algorithm is adopted to solve voltage and reactive power optimization model with the least net loss as objective function. It is introduced main procedure of genetic algorithm and improved method, which is efficient and practical by the computations of 10 kV distribution system.

Key words: distribution system; economic operation; voltage/reactive power optimization; reducing system energy losses