

大型工业企业配电网电压无功控制的研究

杨丽徙¹, 冯越¹, 李桂红²

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 上海宝山钢铁公司 不锈钢分公司, 上海 200431)

摘要: 为了保证大型工业企业的用电质量, 减少电网损耗, 根据其电网特征提出了相应的电压无功控制策略; 首先以监测点功率因数是否达标为依据调控电容器的投切, 然后通过对变压器最小损耗电压的分析, 推出变压器低压母线的最佳运行电压及变压器分接头的调控方式, 针对某大型钢厂配电网实测数据所做的电压无功控制仿真分析结果, 证明了该控制策略的合理性和实用性。

关键词: 大型工业企业配电网; 电压无功控制; 变压器最小损耗电压

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

0 引言

拥有一个或几个 220 kV 变电站的大型工业企业配电网, 具有供电半径短、负荷密度大、负荷自然功率因数低等特点, 如果没有合理的电压无功管理, 它将需要从地区高压电网吸取大量的无功, 严重影响系统的电压质量。单靠地区高压电网的调控措施, 是无法保证其供电质量的, 因此, 必须从企业内部配电网入手, 实现其电压无功的综合调控。目前的电压无功控制研究主要针对大电网或地区电网^[1-4], 其网络结构和负荷特点与大型工业企业配电网有很多不同, 开展针对后者的电压无功控制策略研究具有重要的现实意义。

1 大型工业企业配电网网损分析

1.1 大型工业企业配电网损耗分布

由于大型工业企业配电网具有以下特点: ①供电线路短, 导线截面大, 线路上的电压降和功率损耗一般很小; ②为避免重复性投资, 大型工业企业电网设备的容量选取均有较大的冗余, 部分变压器长时间处在轻载运行状态。

因此, 大型工业企业配电网中, 变压器损耗所占比例远远高于线路损耗, 这与地区配电网的网损构成有较大区别; 其电压无功控制策略也有所不同。在保证电压质量的前提下, 企业配电网的调节重点应该放在有效降低变压器损耗上。

1.2 变压器损耗的构成

变压器损耗主要包括与负荷无关的空载损耗和随负荷变化而变化的负载损耗^[5], 即

$$\begin{aligned}\Delta P &= U^2 G_m + (P^2 + Q^2) R_T / U^2 \\ &= U^2 G_m + S^2 R_T / U^2 \\ &= U^2 G_m + \beta^2 S_N^2 R_T / U^2\end{aligned}\quad (1)$$

式中: U 为变压器的运行电压; R_T 为变压器的等值阻抗; G_m 为变压器电导; P 、 Q 分别为通过变压器的有功和无功功率, 也可以看作变压器所带的负载; β 为变压器负载率; S_N 为变压器额定容量。

1.3 变压器损耗与运行电压的关系

式(1)中的 $U^2 G_m$ 为变压器的空载损耗, 与电压的平方成正比, 电压越高, 空载损耗越大; $\beta^2 S_N^2 R_T / U^2$ 为变压器的负载损耗, 与电压的平方成反比, 假定变压器的负载率 β 不变, 其负载损耗将随着运行电压的升高而减少。因此存在一个临界电压使得变压器的综合损耗达到最小值。

式(1)两端同时对 U 求导, 可得变压器损耗变化量与电压变化量的关系, 即

$$d\Delta P/dU = 2UG_m - 2\beta^2 S_N^2 R_T / U^3 \quad (2)$$

假设 $U = U_0$, 满足 $d\Delta P/dU = 0$, 即

$$U_0 = \sqrt[4]{\beta^2 S_N^2 R_T / G_m} \quad (3)$$

此时, 变压器损耗最小, 故定义 U_0 为负载率为 β 时的变压器最小损耗电压。对一台变压器而言, 变压器最小损耗电压 U_0 是随着变压器负载率

收稿日期: 2009-04-02; 修订日期: 2009-07-08

基金项目: 河南省教育厅自然科学基金(2009A470008)

作者简介: 杨丽徙(1956-), 女, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事电力系统运行与规划、电力 GIS 应用方面的研究。

的增大而增大的。

将 U_0 表达式分别代入变压器空载损耗 $U^2 G_m$ 和负载损耗 $\beta^2 S_N^2 R_T / U^2$ 中, 计算可知此时空载损耗等于负载损耗, 即当变压器空载损耗等于负载损耗时, 变压器损耗最小。

在负载率一定的情况下, 当变压器的负载损耗大于空载损耗时, 运行电压 $U < U_0$, 升高电压 U 可以减少变压器损耗; 当负载损耗小于空载损耗时, 运行电压 $U > U_0$, 降低电压 U 可以减少变压器损耗^[6-7]。

2 变压器最佳运行电压的选择

变压器最小损耗电压 U_0 随着负载率的变化而变化, 当负载率在 $[0, 1]$ 范围内取值时, 其对应的 U_0 的取值范围为 $[0, \sqrt[4]{S_N^2 R_T / G_m}]$, U_0 的变化范围已经大大超出了运行电压的允许范围。所以, 在调节电压以追求最小损耗的过程中, 必须在满足电压标准的基础上进行。因此, 可将变压器状态按照负载率分为 3 个区间, 分别确定各区间变压器最佳运行电压的调控策略。

2.1 变压器负载率的分区原则

以变压器最高允许运行电压 U_{\max} 和最低允许运行电压 U_{\min} 作为 U_0 的上下限, 通过式(3)求出与之对应的负载率 β_{\max} 和 β_{\min} , 将变压器的负载率分为经济负载区 $[\beta_{\min}, \beta_{\max}]$ 、低载区 $[0, \beta_{\min})$ 和高载区 $(\beta_{\max}, 1]$ 3 个区域。

2.2 变压器的最佳运行电压

命变压器损耗达到理论上的最小值, 变压器的负载率与运行电压的关系见表 1。

表 1 变压器负载分区和最佳运行电压

Tab.1 Zone of transformer load and best voltage

区域划分	负载率范围	最佳运行电压
经济负载区	$[\beta_{\min}, \beta_{\max}]$	$U_0 = \sqrt[4]{\beta^2 S_N^2 R_T / G_m}$
低载区	$[0, \beta_{\min})$	U_{\min}
高载区	$(\beta_{\max}, 1]$	U_{\max}

3 大型工业企业配电网电压无功控制策略

3.1 控制的目标

(1) 运行电压。企业配电网各电压监测点的电压应该满足运行电压标准。

(2) 功率因数。企业配电网要求功率因数监测点的功率因数应达标。

供电公司对企业功率因数的考核点设置: 为专线供电时, 设在线路首端; 专变供电时, 设在供

电变压器低压侧出口处, 具体标准见文献[1]。另外, 在制定大型工业企业配电网电压无功控制策略时, 应该在满足这两个目标的同时尽量降低其配电网变压器的损耗。

3.2 电压无功控制的动作判据及整定计算

以图 1 所示的配电网为例, 其中变压器低压母线带 1 ~ n 台下级变压器, 各变压器负载率为 $\beta_1 \sim \beta_n$ 。控制的目标为变压器 T 的低压母线电压 U 和功率因数监测点 A 点的功率因数值达标。控制装置为有载调压变压器 T 分接头和各变压器低压母线并联电容器组。

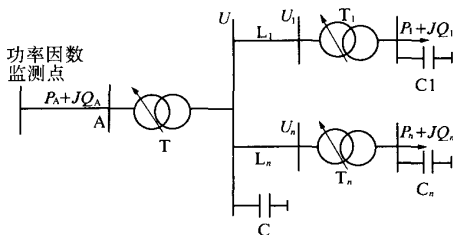


图 1 电网接线示意图

Fig.1 Sketch map of distribution network

3.2.1 电容器投切判据

(1) 首先判断监测点功率因数值是否达标, 当满足要求时, 配电网内各电容器均不动作。

(2) 功率因数越下限时, 根据潮流计算无功差额 ΔQ , 以确定配电网内电容器的投入容量 Q_C , 再根据以下原则确定电容器投入位置。

首先判断负荷侧变压器 $T_1 \sim T_n$ 高压侧的功率因数是否满足要求, 将不满足要求的变压器按功率因数从小到大的顺序排列, 按照此顺序依次投入各自低压母线上的并联电容器, 以满足其变压器高压侧功率因数要求为准。

如果全部投入后监测点功率因数值仍未达标, 则再投入电源侧变压器 T 低压母线电容器。

当满足以下 3 个条件之一时: 一是监测点功率因数值达标, 即 $Q_C \geq \Delta Q$; 二是变压器高压侧功率因数满足要求; 三是其低压母线并联电容器已全部投入。各变压器的并联电容器停止动作。

(3) 当功率因数越上限, 有无功倒送时, 首先应切除变压器的并联电容器, 若功率因数仍越上限, 则判断负荷侧变压器高压侧功率因数是否越上限, 切除越限变压器的并联电容器, 直至各负荷侧变压器高压侧功率因数均不越限。

3.2.2 变压器分接头动作判据

以有载调压变压器低压母线各出线所带的下

级变压器总损耗最小为目标函数,计算出其低压母线的最佳运行电压 U_{zj} , 以此作为标准值设置适当的上下限, 作为变压器分接头的动作判据, 其整定计算过程说明如下:

(1) 在整定计算过程中, 忽略线路上的电压降, 假设变压器低压侧母线的电压 U 与其所带下级变压器高压侧母线电压 $U_1 \sim U_n$ 相等, 即 $U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$.

(2) 确定变压器 T 所带各下级变压器的运行电压允许范围 $[U_{\min}, U_{\max}]$.

(3) 根据变压器运行中的负载率, 以变压器 $T_1 \sim T_n$ 的总损耗最小为目标函数确定变压器 T 低压母线的最佳运行电压 U_{zj} . 由式(4)解出 U :

$$\min_{i=1}^n (U^2 G_i + S_i^2 R_i / U^2) \quad (4)$$

若 $U < U_{\min}$, 取 $U_{zj} = U_{\min}$; 若 $U > U_{\max}$, 取 $U_{zj} = U_{\max}$; 若 $U_{\min} < U < U_{\max}$, 取 $U_{zj} = U$.

(4) 根据 U_{zj} 设置适当的上下限, 保证变压器 T 低压母线电压运行在最优的范围内. 假设 ΔU 为变压器分接头动作一档的电压增量^[8]:

当 $U_{\min} \leq U_{zj} \leq U_{\min} + 0.5\Delta U$ 时, 电压合格区为 $[U_{\min}, U_{\min} + \Delta U]$;

当 $U_{\max} - 0.5\Delta U \leq U_{zj} \leq U_{\max}$ 时, 电压合格区为 $[U_{\max} - \Delta U, U_{\max}]$;

当 $U_{\min} + \Delta U < U_{zj} < U_{\max} - \Delta U$ 时, 电压合格区为 $[U_{zj} - 0.5\Delta U, U_{zj} + 0.5\Delta U]$.

3.3 实现方案

(1) 根据生产计划, 预测各 35 kV 变电所未来一天 24 个整点时刻的有功和无功负荷, 认为每个时间段内的负荷保持不变. (2) 通过潮流计算, 确定各时刻监测点的功率因数以及无功缺额, 根据电容器投切判据确定各时间段内配电网电容器的投入容量和位置. (3) 根据各时刻负荷侧变压器的负载情况进行上级变压器低压母线最优运行电压 Z_{zj} 的计算. (4) 调节变压器分接头, 将各低压母线电压调至 U_{zj} 附近电压合格区内. (5) 给出未来 24 小时各级变电站补偿电容器和有载调压变压器分接头的最佳调节方案.

4 算例分析

以某钢厂配电网为例. 该配电网包含 2 座 220 kV 变电站共 6 台 220/35 kV 变压器, 主变容量均为 120 MVA. 本文仅对 220 kV 1#站配电网进行分析, 浏钢线为功率因数监测点, 如图 2 所示. 各变电站母线电容器配置如表 2 所示. 整点实测

数据及网络参数略.

取 35 kV 变压器运行电压的误差允许范围为 $-3\% U_N \sim +7\% U_N$, 即电压允许范围为 34 ~ 37.5 kV. 根据各变压器固有参数和电压允许范围, 得 1#主变所带各 35 kV 变压器的负载分区, 如表 3 所示.

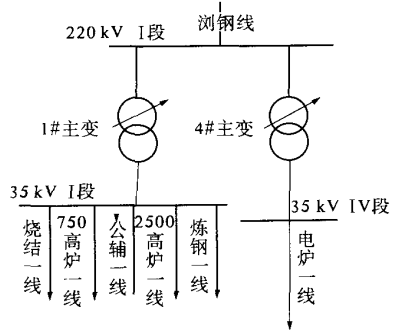


图 2 1#站配电网接线图

Fig. 2 Distribution network of 1# substation

表 2 配电网电容器统计表

Tab. 2 Statistics of capacitor in distribution network

电容器位置	电压/kV	电容器容量/kVA
总降 1 站低压母线 I 段	35	2 × 4 800
1#炼钢变低压母线 I 段	10	5 400 + 3 × 1 200
公辅变低压母线 I 段	10	3 000 + 3 × 800
1#电炉变母线		SVC

注: 烧结变、750 高炉变、2500 高炉变未设置补偿电容器.

表 3 1#主变低压母线所带各 35 kV 主变负载分区

Tab. 3 Zone of every 35kV transformer load %

主变名称	低载区	经济负载区	高载区
烧结 1#主变	[0, 43.8)	[43.8, 53.2]	(53.2, 100]
750 1#主变	[0, 56.2)	[56.2, 68.4]	(68.4, 100]
公辅 1#主变	[0, 32.8)	[32.8, 40.0]	(40.0, 100]
2500 1#主变	[0, 39.8)	[39.8, 48.4]	(48.4, 100]
炼钢 1#主变	[0, 36.2)	[36.2, 44.0]	(44.0, 100]

根据实测数据分析, 正常运行时 1#站各 35 kV 变压器的最小负载率为 24.4%, 最大负载率为 59%; 对照表 3, 各 35 kV 主变的实际负载率基本处于低载区范围内. 则代表日各时段 1#主变低压母线最佳运行电压应为 34 kV.

针对上述调控策略, 应用 PSASP 软件进行仿真计算; 其结果为: 代表日全天, 除 1#炼钢变低压母线 I 段、公辅变低压母线 I 段并联电容器需全部投入运行外, 该电网电压无功调控的关键在 1#主变. 各时段 1#主变分接头及其低压母线并联电

容器的最佳调节方案如表 4 所示. 优化前后电网的损耗对比见表 5.

表 4 220kV 1#主变无功调控最佳动作方案
Tab.4 Best plan of 1# transformer's reactive device action

时间	1#主变	变压器 档位	1#主变电容器 补偿容量/kvar
	低压母线 电压/kV		
00:00 - 02:00	34.25	2 档	2 × 4 800
02:00 - 06:00	34.20	2 档	1 × 4 800
06:00 - 09:00	34.12	1 档	2 × 4 800
09:00 - 20:00	34.25	2 档	1 × 4 800
20:00 - 21:00	34.15	1 档	0 × 4 800
21:00 - 22:00	34.09	1 档	2 × 4 800
22:00 - 23:00	34.20	2 档	1 × 4 800
23:00 - 24:00	34.12	1 档	2 × 4 800

表 5 代表日 1#站有功电量损耗仿真计算结果
Tab.5 Simulation result of 1# substation's active power loss

变压器和线路名称		有功电量损耗/(MW · h)	
		调节前	调节后
变 压 器 损 耗	烧结 1#主变	0.790	0.753
	750 高炉 1#主变	1.481	1.457
	2500 高炉 1#主变	0.938	0.932
	公辅 1#主变	1.954	0.855
	炼钢 1#主变	0.723	0.703
线 路 损 耗	烧结 1 线	0.075	0.077
	750 高炉 1 线	0.213	0.214
	2500 高炉 1 线	0.097	0.099
	公辅 1 线	0.404	0.405
	炼钢 1 线	0.047	0.048
合计		6.722	5.543

5 结 论

本着“降损与调压相结合,降损为主”的思想,通过分析变压器损耗与负载率和运行电压的关系,提出了一种适用于大型工业企业配电网的电压无功控制策略,计算简单快速. 仿真计算结果表明,优化后代表日功率因数监测点浏钢线平均功率因数达到了 0.92,并保证了各母线电压的合格率;代表日 1#站总体网损由原来的 1.262 3% 下降为 1.116 7%,降损效果良好.

参考文献:

[1] 杨丽徙,王 锴. 应用模拟树木生长算法求解无功优化问题[J]. 郑州大学学报:工学版,2008,29(2): 69 - 72.

[2] 谢传治,高喜珠,闫永生,等. 基于非线性原 - 对偶内点算法的电力系统无功优化[J]. 郑州大学学报:工学版,2006,27(2):77 - 80.

[3] 胡宗军,林 莉. 变电站电压与无功实时控制策略的现状与改进方向[J]. 电气应用,2007,26(9):21 - 24.

[4] 余 涛,周 斌. 电力系统电压/无功控制策略研究综述[J]. 继电器,2008,36(6):79 - 85.

[5] 王亚忠. 双绕组变压器经济运行负载系数的研究[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(17):60 - 61.

[6] 曹志平,王方卓. 电力变压器经济运行分析[J]. 电力科学与工程,2008,24(1):41 - 43.

[7] 王亚忠. 电网运行电压对网损和变压器经济负荷率的影响[J]. 内蒙古电力技术,2006,24(2):10 - 12.

[8] 朱春明,刘明波. 变电站电压无功控制范围的整定计算方法[J]. 电力系统自动化,2003,27(8):70 - 74.

Voltage and Reactive Power Control for Large Industrial Enterprise
Distribution Network

YANG Li - xi¹, FENG Yue¹, LI Gui - hong²

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Shanghai Baosteel Group Corporation, Shanghai 200431, China)

Abstract: In order to guarantee the power quality of large industrial enterprises and reduce its loss, a strategy of voltage and reactive power control was proposed according to the characteristics of its distribution network. Firstly, control the capacitors based on whether the power factor of monitor point reach the standard, then through the analysis of minimum loss voltage of transformer, to calculate the best voltage of the transformers' low - voltage bus and to control the transformer tap. The simulation results of a large still mill network proved the rationality and practicability of this strategy.

Key words: large industrial enterprises distribution network; voltage and reactive power control; minimum loss voltage of transformer