

变电站的经济容量优化模型及其 不同负荷密度下的变压器配置研究

厉达¹, 程浩忠¹, 俞国勤², 石方迪², 祝达康²

(1.上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2.上海市电力公司, 上海 200122)

摘要: 利用变压器与线路建设运行的经济技术参数, 考虑多级网络的影响, 通过最优化理论和经济学基本原理, 建立一种变电站经济容量优化计算模型。应用该计算模型, 以常用的4种110/10 kV额定容量变压器为研究对象, 得出不同负荷密度下的经济容量和经济负荷密度区间分布, 既证明了模型的正确性, 也可为电网规划提供参考。

关键词: 经济容量; 负荷密度; 供电半径; 配电网; 变压器

Optimum model for substation's economical capacity and the configuration of transformer under different load density

LI Da¹, CHENG Hao-zhong¹, YU Guo-qin², SHI Fang-di², ZHU Da-kang²

(1. Electrical Engineering Department, Shanghai Jiao Tong University, China;

2. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: Using economic and technical parameters of transformers and transmission line both in operation and under construction, as well as the impact of multilevel network involved, this paper establishes an optimization model for economical substation capacity on the basis of optimization theory and the basic economic principle. According to the calculation model established, four types of 110/10kV transformers with different rating capacity are studied, the economical capacity and the economical load density interval under different load density are obtained, which verifies the validity of the model. The model also can be used as a reference for power system planning.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program)(No.2009CB219703).

Key words: economic capacity; load density; power supply radius; distributing network; transformer

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)19-0005-05

0 引言

在配电网规划中, 变电站容量和供电半径的选择直接决定了规划的合理性和经济性, 并将影响电网运行和电能质量。常用的计算方法是通过电能质量极限值核算供电半径和经济容量, 但极限情况并不是最优情况也不是普遍情况, 这种方法更适用于对供电半径技术合理性的校验。文献[1,2]通过变电站投资运行参数计算变电站经济容量与供电半径, 但影响变电站经济容量与供电半径的因素很多, 本变电站供电半径的不同将影响变电站进线长度和下

级配电站的数目, 所以除了考虑本变电站与出线的经济参数外, 还应该考虑上下多级网络的相关经济参数, 并受不同接线方式的影响。本文将根据多级相关网络的建造和运行参数, 通过最优化计算, 得出变电站经济容量与最优供电半径模型。

在配电网中, 不同额定容量的配电变压器经济运行参数不同, 所组成变电站的经济容量将不同, 最适应的区域负荷密度区间也将不同。本文将利用已建立的变电站经济容量模型, 通过设定不同额定容量的110/10 kV变压器的经济运行参数, 得出各种变压器配置的变电站在不同负荷密度下的经济容量值和经济负荷密度区间, 为不同负荷密度下变电站的变压器配置提出了定量性的规划参考。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 计划 (2009CB219703)

1 变电站经济容量优化模型

1.1 基本假设条件

本节将采用最优化算法建立变电站的经济容量和供电半径计算模型。在模型建立过程中, 设定基本假设条件如下:

(1) 设定的变电站原形为110/10 kV级变电站, 在模型建立过程中考虑高压进线和下级配电网的影响。

(2) 近似认为目标电网覆盖面的电力负荷密度均匀, 变电站的供电区域为圆形, 变电站置于圆心。

(3) 电网主干线的导线截面均按经济电流密度选择。

(4) 在规划的抵偿年限内, 以单位变电容量总费用最小为目标函数。

(5) 投资过程中不考虑资金的动态性, 建设费用分年等量投入, 运行费用在当年的某一负荷水平下一次性投入。

(6) 变电站进线的平均长度, 与接线方式相关。

1.2 不同接线方式的高压进线长度计算模型

变电站的供电半径不同, 其上级高压进线的长度不同, 并跟接线方式有关, 首先建立高压进线长度的计算模型。

(1) 根据文献[3], 采用放射型接线的网络可求出变电站的平均进线长度为:

$$L = 0.66KR\sqrt{\frac{S'}{S}} \quad (1)$$

式中: K 为线路曲折系数; R 为 110 kV 变电站平均供电半径。 S' 为上级变电站容量, S 为本级变电站经济容量。

(2) 两级支接变电站平均进线长度的计算公式为:

$$L = K(0.33\sqrt{\frac{S'}{S}} + 1)R \quad (2)$$

(3) 三站手拉手接线示意如图 1, 其中正方形为 220 kV 站, 三角形为 110kV 变电站。

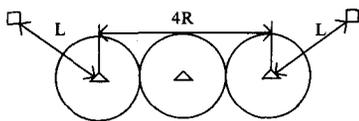


图 1 三站手拉手接线示意图

Fig.1 "Hand in Hand" connection of three substations

由图 1 和式 (1) 可得三站手拉手接线平均进线

长度

$$L = \frac{K(2L+4R)}{3} = \frac{K}{3}(1.32\sqrt{\frac{S'}{S}} + 4)R \quad (3)$$

类似地, 四站手拉手接线示意如图 2 所示。

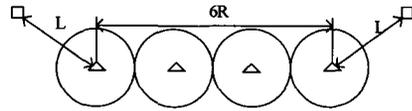


图 2 四站手拉手接线方式示意图

Fig.2 "Hand in Hand" connection of four substations

由图 4 得四站手拉手接线平均进线长度为:

$$L = \frac{K(2L+6R)}{4} = \frac{K}{4}(1.32\sqrt{\frac{S'}{S}} + 6)R \quad (4)$$

综上所述, 可得 N 站手拉手的平均进线长度为:

$$L = \frac{K[1.32\sqrt{\frac{S'}{S}} + 2(N-1)]R}{N} = PKR \quad (5)$$

式中: P 为进线参数。

1.3 低压开关站数量估算模型

根据文献[4], 变电站的经济容量和供电半径将决定所需的低压开关站的数量和费用, 低压开关站的建造和运行费用反过来也将影响变电站的经济容量和供电半径的核算。因为开关站对上级变电站的影响是间接的, 为便于计算, 本节只考虑开关站的建设费用, 所以有必要建立开关站的数量估算模型。

开关站的数量根据规划区内负荷分配的比例及进线电缆型号、接线模式来确定。具体公式如式 (16):

$$N_k = \text{ceil} \left\{ \frac{S \cdot \alpha}{S_k \cdot \cos \varphi \cdot \beta} \right\} \quad (6)$$

式中: S 为变电站经济容量, S_k 为单个开闭所的总容量, α 为区域负荷分配比例, β 为利用率。

1.4 变电站经济容量优化模型的建立过程

根据基本假设条件, 用年费用法建立静态模型如下:

$$F = Z / N + \mu \quad (7)$$

其中: F 为年费用, Z 为总投资费用, μ 为运行费用。单位容量的年费用函数可表示为:

$$F = F / S = [(Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3) / N + \mu_1 + \mu_2 + \mu_3] / S \quad (8)$$

式中: S 为变电站经济容量, 变电站本体建设投资费用为:

$$Z_0 = a_0 + b_0 S \quad (9)$$

a_0 为投资中与变电站容量无关部分的系数(万元); b_0 为投资中与变电站容量有关部分的系数(万元/MVA); 根据式(1)~(5)高压进线建设投资费用为:

$$Z_1 = L(a_1 + b_1 S) = PKR(a_1 + b_1 S) \quad (10)$$

a_1 为与容量无关的单位长度进线总投资(万元/km), b_1 为单位长度和单位容量投资值(万元/kmMVA), P 为进线参数。变电站中压出线建设投资费用为:

$$Z_2 = L'(Ma_2 + b_2 S_1) \quad (11)$$

式中: $M = S \cos \varphi / P_{av}$ 为中压配电网出线回路数; $L' = KR$ 为中压配电网出线每回线路长度; P_{av} 为每一回路线路平均负荷; K 为曲折修正系数; S_1 为变电站全部的中压配电网出线导线总截面积。下级中压开关站的建设费用为:

$$Z_3 = N_k F_k \quad (12)$$

N_k 为所需开关站的个数, F_k 为开关站的造价, 因为运行费用与变电站容量关系不大, 所以只考虑建设费用。

$$\mu_1 = H(Z_0 + Z_2) \quad (13)$$

式(13)为高压变电站和中压配电网线路的运行费用的不变部分(大修、小修、折旧费)与总投资的正比例函数。

$$\mu_2 = \Delta P \tau C_0 = 7.26 \frac{E \rho J \tau C_0}{U_N \cos^2 \varphi \sqrt{\sigma}} S^{3/2} 10^{-5} \quad (14)$$

式(14)为全年中压线路损失费。而变电站变压器的损失费用为:

$$\mu_3 = (8760 C_0 K_{Fe} + C_0 \tau_b K_{cu}) \gamma S_{NL}^{\frac{3}{4}} \quad (15)$$

其中: γ 为变压器的台数。

将式(5)、(6)、(10)~(15)代入式(8)中,得:

$$F_0 = \left(\frac{1}{N} + H \right) \left(\frac{a_0}{S} + b_0 \right) + \frac{PK}{N} \sqrt{\frac{1}{\pi \sigma K_c}} a_1 S^{-\frac{1}{2}} + \left[\sqrt{\frac{1}{\pi \sigma K_c}} \left(\frac{a_2 \cos^2 \varphi}{P_{av}} + \frac{b_2}{\sqrt{3} U_N J} + P b_1 \right) + 7.26 \frac{\rho J \tau C_0}{U_N \cos^2 \varphi \sqrt{\sigma}} 10^{-5} \right] S^{\frac{1}{2}} + (8760 C_0 K_{Fe} + C_0 \tau_b K_{cu}) \gamma \frac{S_{NL}^{\frac{3}{4}}}{S_N} + \frac{a F_k}{S_k \cdot \cos \varphi \cdot \beta N} \quad (16)$$

式中: P 为进线系数, 各种接线方式取值见式(1)~(5); H 为对总投资提取的年运行费的年提取系数; σ 为平均负荷密度; K_c 为容截比; U_N 为额定电压; J 为导线经济电流密度; ρ 为导线电阻率; τ 为年平均最大负荷损耗小时数; C_0 为损耗电度成本电费; K_{Fe} 为变压器的铁损系数; τ_b 为变压器的铜损耗等值小时数; K_{cu} 为变压器铜损系数; S_{NL} 为每台变压器的额定负荷; S_N 为每台变压器额定容量; L 为上级电源的进线长度。

静态模型的目标函数确定为单位容量的年费用最小, 即 $\min F_0$ 。

变电所的容量是非负的, 即 $S > 0$ 。 F_0 是关于 S 的指数多项式函数。因此, 问题可转化为在容量 $S > 0$ 的约束下求年费最小, 其模型为:

$$\min F_0 (AS^{-1} + BS^{\frac{1}{2}} \sigma^{-\frac{1}{2}} + CS^{-\frac{1}{2}} \sigma^{\frac{1}{2}} + D) \quad (17)$$

s.t. $S > 0$

式(17)即为经济容量优化模型。其中目标函数 F_0 的系数既可为普通正实数, 也可在某一区间内变化的模糊数, 可根据不同的数学方法求解。

求解式(17), 获得其最优解后, 可再利用公式

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi \sigma K_c}} \quad (18)$$

$$n_b = \frac{1}{\pi R^2} = \frac{N_b}{Q} \quad (19)$$

$$N_b = \frac{Q}{\pi R^2} \quad (20)$$

获得变电所平均供电半径 R , 单位面积上变电所的个数 n_b 和变电站的平均个数 N_b , 这里 Q 为城市电网供电区域面积, 从而为电网规划提供计算参考。

2 常用配电变压器的负荷密度适应性研究

2.1 基本参数设置

以110/10 kV双绕组配电变压器为研究对象, 根据文献[5,7]以及配电网的普遍情况设定配置各种容量变压器的变电站均适用的基本参数如下: $N=10$ 年; $H=8\%$; $K_c=2.0$; $P_{av}=5$ MW; $U_N=10$ kV; $J=1.15$ A/mm²; $\rho=31.5$ Ω·mm²/km; $\tau=3000$ h; $C_0=0.6$ 元/kW·h; $K=1.3$; $S_k=6000$ MW; $\alpha=0.6$; $\beta=1$; $P=2.1$ 。假定模型变电站出线型号相同并留有三个变压器位置, 下级单个开关站容量和投资相

同。

2.2 不同额定容量变压器的技术经济参数设置

本节主要分析常见的31.5 MVA、40 MVA、50 MVA、63 MVA四种额定容量的110/10 kV配电变压器。通过文献[5-9]可知,不同容量的变压器在经济技术参数上有较大的差别,反映在变电站经济容量模型上主要是:变电站投资的不同,下级配电站数目的不同,出线投资不同,单位容量损耗不同等,上级220 kV变电站的变压器取为3×240 MVA时具体参数取值见表1。

表1 110/10 kV变压器参数表

Tab.1 Parameters of 110/10 kV transformers

变压器容量/MVA	31.5	40	50	63
a_0 /万元	2 000	2 050	2 090	2 130
b_0 /(万元/MVA)	125	103	96	90
a_1 /万元/km	90	90	90	90
b_1 /万元/km.MVA	3.8	3.5	3.2	3.0
a_2 /(万元/km)	20	28	33	40
b_2 /(万元/km mm ²)	0.165	0.163	0.161	0.160
K_{Fe} /(MW/MVA ²)	0.008 5	0.008	0.007 8	0.007 2
K_{cu} /(MW/MVA ²)	0.053	0.050	0.004 7	0.045

2.3 不同额定容量变压器的负荷密度适应性

根据式(17)中的模型,代入2.1与2.2节的数据,设定不同的区域负荷密度值,应用文献[10]中的计算方法和Matlab计算程序,可得配置不同容量变压器的变电站在不同负荷密度下的经济容量如表2所示。

表2. 不同负荷密度下110/10kV变压器的经济容量

Tab.2 Economic capacity of 110/10kV transformers on different load density

负荷 / (MW/km ²)	经济容量 31.5 MVA	经济容量 40 MVA	经济容量 50 MVA	经济容量 63 MVA
1.5	48.32	49.54	52.83	55.29
3.0	60.41(2)	63.21	67.65	70.32
5.0	67.50	75.37(2)	84.72	92.30
7.0	82.96	91.55	101.03(2)	109.52
8.0	92.43(3)	104.22	110.37	118.5
10	—	124(3)	131.51	136.42(2)
12	—	—	152.65(3)	165.21
15	—	—	—	192.3(3)

因为变电站的容量只能是所配置的变压器容量的整数倍,只有在变压器整数倍附近的经济容量才

有实际的配置意义。通过表2的变压器台数标注可以得出:不同变电站在不同负荷密度下投运几台何种容量的变压器经济上最优。因为表2的计算值是在容载比为2.0的情况下得出,实际容载比为一个区间值,一般取1.8~2.3。所以在容载比可以接受的范围内,可以得出变电站不同变压器配置的经济负荷密度区间如表3。

表3 变电站经济负荷密度区间

Tab.3 The economical load density interval of substations

变电站变压器配置	变电站经济负荷密度区间 / (MW/km ²)
2*31.5 MVA	2.817-3.481
3*31.5 MVA	7.363-9.407
2*40 MVA	4.770-6.095
3*40 MVA	8.784-11.224
2*50 MVA	6.237-7.969
3*50 MVA	10.656-13.616
2*63 MVA	6.696-8.556
3*63 MVA	13.338-17.043

由表3可以看出,不同变压器配置的变电站,在满足容载比的前提下,通过经济容量计算的经济负荷密度是一个区间值,也就是在这样一个负荷区间内变电站经济最优。表中显示小容量变压器适应的经济负荷密度较小,而且同一变电站内配置变压器越多,适应的经济负荷密度越大。四种常用变压器的不同台数配置,可基本保证经济负荷密度区间的连续性,当一个区域达到某个负荷密度时,本区域的110 kV变电站就有经济上最优的变压器配置方式,这可以为规划工作提供参考。以上海周浦镇规划为例。

上海南汇周浦镇目前不同功能区的负荷密度为3~9 MW/km²,应用31.5 MVA的配电变压器,根据表3则基本符合经济负荷密度的要求。但周浦镇目前正在迅速城市化进程中,部分片区远期负荷饱和值可以达到18 MW/km²。目前的区域最大负荷密度9 MW/km²,距离3×31.5 MVA的经济负荷密度上限9.407 MW/km²已经很近,区域内各变电站需要扩容,根据表3和周浦镇各片区的预测负荷密度饱和值,可以得出:饱和负荷密度小于6.095 MW/km²的片区建议变电站扩容应用40 MVA的变压器;饱和负荷密度大于6.095 MW/km²小于13.616 MW/km²的片区建议变电站扩容应用50 MVA的变压器;饱和负荷密度大于13.616 MW/km²的区域变电站扩容直接应用63 MVA的变压器。

3 结论

从变电站的变压器和线路的建设和运行参数出发, 考虑了多级电网的影响, 从经济学的角度建立了变电站经济容量优化模型。多级电网参数的应用保证了模型的科学全面性, 最优化理论保证了模型的准确性。模型可以计算各电压等级变电站的经济容量和最优供电半径, 对电网规划具有一定的指导意义。

应用已建立的变电站经济容量优化模型, 以 110 kV 变电站为研究对象, 通过对 4 种常用额定容量的双绕组变压器的建设运行参数的统计分析, 得出配置不同容量变压器的变电站的经济容量和经济负荷密度区间, 并对不同负荷密度下变电站的变压器配置提出了定量性的建议。

分析计算结果表明: 在满足容载比的前提下, 通过经济容量计算的变电站经济负荷密度是一个区间值; 小容量变压器适应的经济负荷密度较小, 而且同一变电站内配置变压器越多, 适应的经济负荷密度越大; 4 种常用 110/10 kV 变压器的不同配置, 可基本保证经济负荷密度区间的连续性。

参考文献

- [1] 于永源, 王贤正, 杨绮雯. 变电所经济供电半径的优化选择[J]. 电力科学与技术学报, 1991, 6 (1): 118-124.
YU Yong-yuan, WANG Xian-zheng, YANG Qi-wen. Optimizational Selection for Substation Feed Economic Radius[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 1991, 6 (1): 118-124.
- [2] Obrad M. Mikic Mathematical Dynamic Model for Long-term Distribution System Planning[J]. IEEE Transaction Systems, 1996, (1): 34-41.
- [3] 胡丹, 程浩忠, 等. 开发区配电网供电方式的选择方法[J]. 电力建设, 2006, 27(8): 15-18.
- HU Dan, CHENG Hao-zhong, et al. Selection Method for Power Supply Mode of Distribution Network in Developing Zone[J]. Electric Power Construction, 2006, 27(8): 15-18.
- [4] 陈章潮, 程浩忠. 城市电网规划与改造(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [5] 刘启太. 电力变压器有关参数选择及经济比较[J]. 海南大学学报, 1998, 6(2): 114-117.
LIU Qi-tai. Selection of Relevant Parameters and Comparison of Economy of the Electric Power Transformer[J]. Naturnl Science Journal of Hainan University, 1998, 6(2): 114-117.
- [6] 黄向前. 浅谈变电所内变压器的经济运行[J]. 电网技术, 2000, 24 (3): 66-69.
HUANG Xiang-qian. On Economic Operation of Transformers in Substations[J]. Power System Technology, 2000, 24(3): 66-69.
- [7] DL/T599-1996, 城市中低压配网改造技术导则[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [8] 王泽一. 城市电网规划技术经济指标的评价研究(硕士学位论文)[M]. 北京: 华北电力大学, 2005.
- [9] 上海电网若干技术原则的规定[Z]. 上海市电力公司, 2004.
- [10] 陈宝林. 最优化理论与算法(第2版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

收稿日期: 2008-10-20 修回日期: 2008-12-05

作者简介:

厉达(1983-), 男, 硕士研究生, 从事电网规划、优化等研究工作; E-mail: liday2004@163.com

程浩忠(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电能质量, 电力系统规划、优化、电压稳定等方面的研究工作。

许继 2.0 MW 双馈风力发电机组正式开工生产

2009年9月17日下午, 许继集团在中原电气谷举行 2.0 MW 双馈风力发电机组装配开工典礼。

许继 2.0 MW 系列双馈异步风力发电机组是许继集团联合国家电网公司邀请国内风电资深专家在深入调研和论证国内风机运行现状、接入电网需求、中国风资源状况和气候条件等因素, 在 Windtec 公司成熟的 1.5 MW 双馈异步风力发电机组平台上开发的一款划时代的电网友好型风力发电机组, 整机性能居国际领先水平。该套机组创国内同类产品多项第一: 第一款电网友好型风机, 第一款真正抗低温、抗风沙的风机, 第一款系列化同时通过 GL 和鉴衡认证的风机, 第一款完全国产化并且拥有自主知识产权的风机, 而且该机组拥有中国最先进的低电压和过电压穿越技术、最先进的全功率仿真出厂检测技术。

据介绍, 许继 2.0 MW 双馈风力发电机组从项目概念、计划、设计、部件采购到工厂筹建、施工, 直至按期生产, 前后历时两年。两年来, 许继风电科技人秉承打造全球最先进的风机的信念, 团结协作、艰苦拼搏, 跨越了一道道难关, 冲破了一次次挑战。集团公司第一台风电样机将按预订计划顺利下线出厂。