

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.07.025

基于负荷持续模型的 10 kV 配电线路无功优化配置

张学军¹, 陆献传¹, 章坚民², 孙彦超², 吴磊²

(1. 国网新昌县供电公司, 浙江 新昌 310006; 2. 杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:为了在配电网无功优化配置中考虑到未来规划年的各种负荷分布,提出了基于负荷持续模型的 10 kV 配电线路无功优化配置模型及算法;通过对历史日负荷持续曲线的聚类分析及选择合适算法,得到了各季节的代表日,对代表日的代表时刻又提出了相应的选择方法,从而提出了具有依据的配电网未来长期运行的代表断面负荷模型,并提供了等效运行时间计算方法。研究表明,该方法既避免了过于简单的负荷模型带来的决策质疑,也避免了复杂化负荷模型带来的繁重计算。该方法已在县级电网进行了应用,说明了其可行性与正确性。

关键词:配电网;无功优化配置;负荷持续模型;聚类分析;代表日等效运行时间计算;代表时刻等效运行时间计算

中图分类号:TM761.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)07-0937-05

10 kV distribution line reactive optimal configuration based on load duration modeling

ZHANG Xue-jun¹, LU Xian-chuan¹, ZHANG Jian-min², SUN Yan-chao², WU Lei²

(1. State Grid Xinchang County Electric Power Company, Xinchang 310006, China;

2. College of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to consider the load variation for future planning years, in the the model and algorithm for 10 kV distribution line reactive optimal configuration based on load duration model were presented. By the cluster analysis of historic daily load duration curves, a calculation method for the representative day for all seasons together with a calculation method for the representative hour for the representative days, were presented to calculate the equivalent operation time. The reasearch results indicate that this method can make the load model much more practical and refined, and make the distribution line reactive configuration optimization to avoid the doubts by using simple data model, or the heavy calculation by adopting a very complicated load model. Real application has approved the feasibility and correctness of such modeling.

Key words: distribution network; reactive optimal configuration; duration load model; cluster analysis; calculation of equivalent operation time of representative day; calculation of equivalent operation time of representative hour

0 引 言

10 kV 及其以下配电网网损率最大,2005 年国网实测中占全网比重达 44.9%^[1],降损潜力巨大,需要有效、合理地进行无功配置。

配电网无功优化配置是在保证配电系统安全、可

靠运行的前提下,选取最佳的无功补偿位置,确定最优的无功补偿容量,从而最大限度地提高配电网电压水平、降低配电网网络耗损;它是一个多目标函数、多约束条件、多变量的混合非线性规划问题,其优化变量既有连续变量如节点电压,又有离散变量如变压器档位、无功补偿装置投入组数及基准容量等,离散变量的处

收稿日期:2014-01-24

作者简介:张学军(1969-),男,浙江新昌人,工程师,主要从事电力生产与电网规划管理方面的研究. E-mail:44735681@qq.com.

通信联系人:章坚民,男,教授. E-mail:zhangjmhcn@hdu.edu.cn

理更增加了优化问题的难度,使得传统的优化方法难以求解,因此人工智能优化方法得到应用,如遗传算法或变形^[2-5]、禁忌搜索算法^[6]、模拟退火算法^[7]、粒子群算法^[8]等。

配电网无功优化配置必须考虑未来规划年的电网各种运行状态,其中一个关键模型就是负荷。以往的研究大多做了简化,一般采取多年不同负荷水平分段;如采用 1 年 3 种确定的典型负荷持续曲线或采用重、平、轻 3 个典型负荷时段断面等,其负荷代表性值得质疑,也包括由该潮流计算获取的多年网损估计值,严重影响到配置决策。

随着配网各类配变终端和智能电表的广泛应用,积累了大量的负荷数据,有必要充分利用其来提出更为科学、精确的负荷模型的网损计算以及配网无功优化算法。该算法既要考虑到基于现有智能配网量测资源^[9]与统一信息模型^[10],又兼顾半自动化量测状态、量测条件不统一、量测缺失或冗余等各种情况;通过代表日或代表潮流断面的选择,有利于提出高效、适用、计算时间有限的优化模型,但需要有充分的依据^[11]。

本研究在对通用配电网无功补偿规划数学模型进行研究基础上,对其适合的负荷模型进行专门的研究,并结合实例进行计算。

1 配电网无功优化配置数学模型

1.1 目标函数

配电网无功优化问题主要涉及无功补偿设备安装位置的选取及无功补偿设备容量的确定等,同时满足相应约束条件,并且达到预期目标的优化问题,是一个多目标函数、多约束条件、多变量的混合非线性规划问题。目标函数通常要满足以下几个方面:①网损最小;②电压水平最好;③无功补偿容量最小;④配电网综合经济效益最好。

配电网无功优化规划过程中,笔者可以根据目标函数的不同选择适当的数学模型。本研究通过对配电网实际运行情况的分析,全面考虑系统网损效益、无功补偿费用、电压水平等因素,建立了以综合费用最小为总目标函数的数学模型,在配电系统多种负荷水平运行下,将无功补偿电容器的补偿容量设为离散的决策变量,在保证系统电压水平的前提下,使配电网无功补偿有较高的经济效益。

(1)无功补偿投资费用最小。公式如下:

$$P_c = \sum_{i=1}^{N_c} C_v Q_{ci} \quad (1)$$

式中: P_c —无功补偿投资费用; N_c —补偿节点集; C_v —电容单价; Q_{ci} —补偿节点 i 处的补偿容量。

(2)总网损费用最小。公式如下:

$$P_L = \int_{t_0}^{t_p} k_e(t) P_{ls}(t) dt = \sum_{s=1}^{t_c} K^s t^s \Delta P^s \quad (2)$$

式中: P_L —规划期总网损; $k_e(t)$ —与时刻 t 相关的电价; $P_{ls}(t)$ —时刻 t 的网损; $[t_0, t_p]$ —规划年的起始时刻与结束时刻; t_c —通过系统负荷曲线确定的负荷水平数; $K^s, t^s, \Delta P^s$ —在负荷水平 s 下系统的电价、等效运行时间、网损。

这表明,总网损不仅与电价有误,更与随时间变化的网损有关,负荷又在后者起关键作用,而无功配置的本质是应对或补偿变化的负荷。

在规划中,很难准确预测未来规划期随机性的负荷变化,因此本研究采用多种负荷水平下的系统运行来近似描述。显然,式(2)后一等式的成立是至关重要的,是本研究的一个研究重点。

1.2 等式约束条件

配电网的潮流方程如下所示:

$$P_{Gi}^S - P_{di}^S - V_i^S \sum_{j=1}^n V_j^S (G_{ij} \cos \theta_{ij}^S + B_{ij} \sin \theta_{ij}^S) = 0 \quad (3)$$

$$Q_{Gi}^S - Q_{di}^S + N_{ci}^S Q_{ci} - V_i^S \sum_{j=1}^n V_j^S (G_{ij} \sin \theta_{ij}^S - B_{ij} \cos \theta_{ij}^S) = 0 \quad (4)$$

式中: i —PV 或 PQ 节点数; P_{Gi}, Q_{Gi} —注入节点 i 的有功功率、无功功率; P_{di}, Q_{di} —节点 i 的负荷有功功率、负荷无功功率; n —系统节点总数; V_i —节点 i 的电压; Q_{ci} —电容器(电抗器)每组无功补偿容量; N_{ci} —电容器(电抗器)的补偿组数;所有参数上标 S —系统各种负荷水平参数。

1.3 不等式约束条件及罚函数

(1)节点电压约束及罚函数。约束条件如下:

$$V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax} \quad (i=1, 2, \dots, n_i) \quad (5)$$

式中: V_i —节点 i 的电压; V_{imin}, V_{imax} —节点电压的上、下限。

引入罚函数:

$$P_v = K_v \sum_{i=1}^n (V_i - V_{iset})^2 \quad (6)$$

$$V_{iset} = \begin{cases} V_{imax} & (V_i > V_{imax}) \\ V_i & (V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax}) \\ V_{imin} & (V_i < V_{imin}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_v —电压越限惩罚费用, K_v —电压越界惩罚因子。

(2)热动稳定约束及罚函数。

为满足热、动稳定性的要求,所有设计导线,均有如下最大电流限制:

$$P_i = \begin{cases} K_I(I_j - I_{imax})^2, & I_j \geq I_{imax} \\ 0, & I_j < I_{imax} \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_i —电流越限惩罚费用; I_j —支路 j 的电流; I_{imax} —第 j 条支路允许通过的电流上限; K_I —导线电流越限惩罚因子。

1.4 控制变量约束

配电网无功优化的控制变量包括补偿容量 Q_c 、带负荷可调变压器变比为 T , 有:

$$T_{imin} \leq T_i \leq T_{imax} \quad (i = 1, 2, \dots, n_t) \quad (9)$$

$$Q_{cimin} \leq Q_{ci} \leq Q_{cimax} \quad (i = 1, 2, \dots, n_c) \quad (10)$$

式中: n_t —可调变压器数量; T_i, T_{imax}, T_{imin} —可调变压器的变比及其上、下限; n_c —电容器(电抗器)补偿节点总数; $Q_{ci}, Q_{cimax}, Q_{cimin}$ —节点 i 补偿容量及其上、下限。

1.5 综合目标函数

总目标函数 F 为综合费用最小, 即:

$$\min F = P_c + P_L + P_v + P_i \quad (11)$$

2 合适的日负荷模型及代表日选取

2.1 基于代表日、代表时刻的总网损费计算算法

为简单计, 电价只分为峰谷2段, 且与季节无关; 选择4个负荷水平, 对应于春夏秋冬, 则式(2)可写为:

$$P_L = \sum_{s=1}^{t_c} K^s t^s \Delta P^s = K_p \sum_{s=1}^4 t_p^s \Delta P_p^s + K_d \sum_{s=1}^4 t_d^s \Delta P_d^s \quad (12)$$

式中: K_p, K_d —峰谷电价。

显然所谓代表日的代表损耗具有代表性, 就是其所代表的日峰总损耗 ΔP_p 与其等效历时 t_p 的乘积要与该负荷水平下的季节总日峰网损相等或相近, 对于谷时网损也是同理。

公式(2)中的 ΔP^s 可以由线路线损和配变铜铁损表示。配变计量方式分为高供高计和高供低计, 对于前者由于在有功电表、无功电表里已经包括铜铁损, 只需考虑高供低计的配变。只考虑日峰时段, 则有:

$$\Delta P_p^s = \int_{t=1}^{hp} \left(\sum_{j=1}^{N_j} r_j (I_{pj}^s(t))^2 \right) dt + \quad (13)$$

$$\int_{t=1}^{hp} \sum_{m=1}^{F_d} (P_0^s(m) + k_m (I_{pm}^s(t))^2) dt$$

式中: hp —日峰段的总时间; r_j —第 j 条支路的电阻; I_{pj} —第 j 条支路的电流, 总支路数为 N_j ; $P_0(m)$ —第 m 个高供低计的配变铁损(总个数为 F_d); k_m —其铜损系

数; I_m —其流过的电流; 所有参数上标 S —系统各种负荷水平参数。

显然, 为减少计算工作量, 公式(13)可以采用某一代表时刻来代表, 如 t_1 , 则(13)可表示为:

$$\Delta P_p^s = \sum_{j=1}^{N_j} H_{rj} r_j (I_{pj}^s(t_1))^2 + \quad (14)$$

$$hp \sum_{m=1}^{F_d} P_0^s(m) + \sum_{m=1}^{F_d} H_{rm} k_m (I_{pm}^s(t_1))^2$$

式中: 右侧第1项—线段线损; 第2项—常数; 第3项—高供低计配变铜损; H_{rj} —采用 t_1 时刻代表整个日峰段 hp 的线段 j 损耗等效运行时间; H_{rm} —采用 t_1 时刻代表整个日峰段 hp 的第 m 个高供低计配变铜损的等效运行时间。

2.2 日负荷特性曲线与日负荷持续曲线模型

日负荷特性曲线有2类, 一类是其与时间直接关系的负荷曲线, 另一类为负荷持续曲线, 即按负荷数值大小以及持续时间的曲线过程, 或称频率模型。从公式(12,14)可以看出, 对规划模型更为重要就是负荷持续曲线, 而不是一般的日负荷曲线。负荷持续曲线与日负荷曲线是一对多关系, 说明负荷持续曲线的代表面更广。

经归一化的负荷曲线再经过聚类分析所得的负荷曲线称为负荷特性曲线, 反映用户的用电行为; 同理, 经归一化的负荷持续曲线再经过聚类分析所得的曲线称为负荷持续特性曲线。而基于用电采集系统的负荷持续特性曲线更为稳定且代表性远超过负荷特性曲线。本研究案例1条线路的61节点负荷某月4天共242条日负荷曲线如图1所示。采用k-means聚类算法计算获取的8条典型日负荷持续特性曲线, 其横坐标为时间(每单位为15 min, 即负荷的采样间隔), 纵坐标为归一化后的功率值。

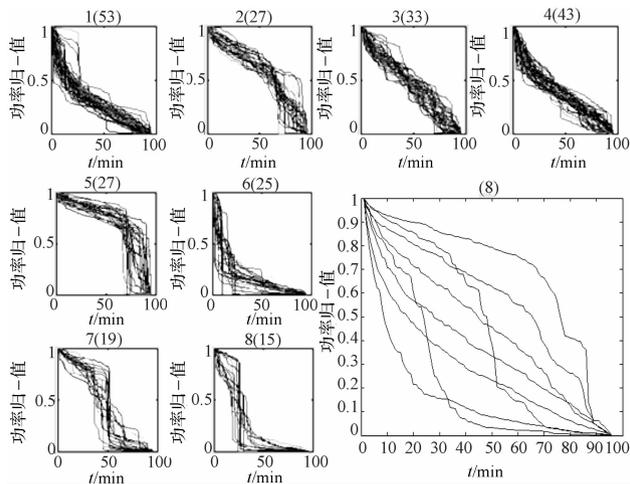


图1 日负荷持续特性曲线聚类分析

2.3 典型代表日选取

文献[12]给出某一时段内,如1个月的典型日选取方法:先去掉畸形日负荷曲线,然后采用最小距离法得到某一日负荷分类;对这些分类的日负荷归一化,计算其平均日曲线作为基准日曲线;计算分类中与该基准日曲线关联度最高的日负荷作为该月的代表负荷曲线,该日则选为代表日。

2.4 典型代表日的等效运行时间计算

首先划定每天为峰、谷2段(各12h);对每季的每日计算峰段电量,并形成日峰电量持续曲线如图2所示。对于选定的代表日,也可计算获得其峰段电量 A_p ,在图2可求解得到幅值为 A_p 但面积等效于电量持续面积的长方形的宽度,即该季等效峰段运行时间 t_p 。同理可计算获取 t_d 。

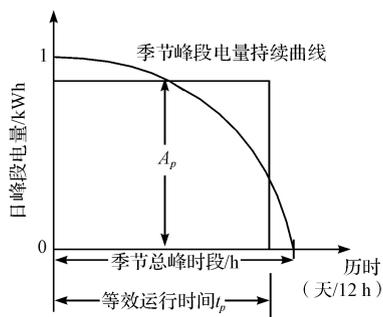


图2 根据代表日峰电量 A_p 计算等效运行时间 t_p

2.5 典型时刻的等效运行时间计算

针对所有末梢节点负荷,通过聚类分析均可获得其对应的典型负荷持续曲线。同样针对所有线段,可以通过潮流计算,获取其负荷侧节点的典型潮流持续特性曲线;对于不同的无功配置,由于线路损耗在该线段 j 下接负荷直接相加后的负荷相比占比很小,可采用该线段 j 下接负荷直接相加的负荷曲线来代替,因此通过总加的负荷曲线可聚类分析获取线段的日负荷持续特性曲线,如图3所示。

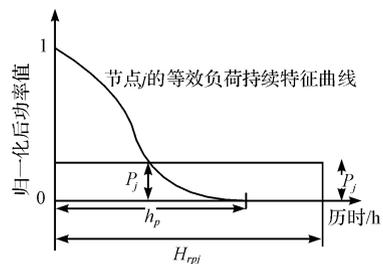


图3 功率代表值 P_j 通过负荷持续特征曲线计算等效时间 H_{rj}

对于典型代表日的代表时刻的选择,主要是要找到发挥无功补偿装置最大作用的时刻,显然对于具体

线路而言,功率因数小且负荷高是较为合适的选择依据。基于各负荷点的功率因数小且负荷高的时刻存在着严重不同步,因此只能以变电站10kV出线的代表日的总负荷曲线中选择,如选择为 t_1 。通过 t_1 可以查到所有末梢负荷的有功量以及线段潮流有功量,然后到相应的典型日负荷持续特性曲线中查取其等效运行时间;举例而言,如图3所示,该线段 j 在 t_1 时刻的有功为 P_j ,通过该值,在其典型持续曲线上构建一个与持续曲线等面积的长方形,长方形的宽度即 P_j 的等效运行时间 H_{rj} 。

3 算例与分析

3.1 配电网结构

本研究以1086线为例,结构如图4所示。

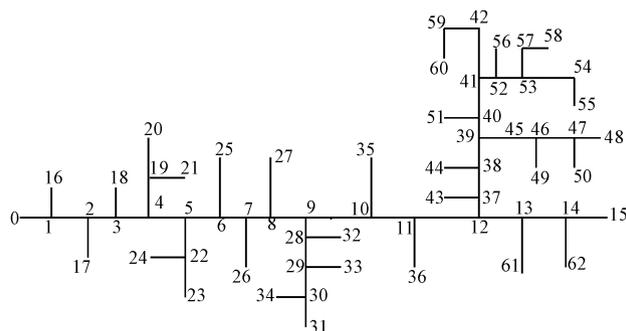


图4 1086线的网络结构图

3.2 配电网无功优化的潮流计算及计算结果

本研究采用前推回代潮流算法程序。算例的负荷数据由用电信息采集系统直接提供,按第2节方法选取每季各一个典型代表日来替代全季的负荷;代表日分峰谷两段,又选择1个代表时刻,作为代表负荷。本研究采用遗传算法进行基于该负荷模型的节点无功配置优化计算,结果如表1所示。采用无功配置后,线路线损率下降21%。

表1 节点优化补偿容量

补偿节点号	16	18	24	26	31	34
补偿容量/kVA	60	80	100	20	20	60
补偿节点号	35	43	44	45	49	54 56
补偿容量/kVA	40	80	20	40	60	40 20

4 结束语

本研究通过对历史负荷数据的聚类分析,选择合适算法得到各季节的代表日,并对代表日的代表时刻又提出相应的选择方法,从而提出了具有依据的配电网未来长期运行的代表断面负荷模型,并提供了等效

运行时间计算方法。基于这种细致化负荷模型的全网无功优化规划,不仅使代表负荷更接近实际负荷,代表性更为充分,既避免了过于简单的负荷模型带来的决策质疑,也避免了复杂化负荷模型带来的繁重计算。本研究提供的方法也适应更细致的负荷时段划分,如全年按12个月,日划分为峰、谷、平3段等。该方法已在新昌县电网进行了应用,研究结果表明,本研究所提方法可行,由于负荷模型更接近实际,决策更为科学和准确。

参考文献(References):

- [1] 余卫国,熊幼京,周新风,等. 电网技术线损分析及降损对策[J]. 电网技术,2006,30(18):54-57.
- [2] 任震,唐卓尧,张勇军. 电网无功优化的改进遗传算法[J]. 电力自动化设备,2002,22(8):16-19.
- [3] 张勇军,任震,钟红梅,等. 基于灾变遗传算法的无功规划[J]. 电力系统自动化,2002,26(23):29-32.
- [4] 侯学勇,丁晓群. 基于遗传-模拟退火算法的配电网电容器优化配置[J]. 电网技术,2005,29(4):81-84.
- [5] 史燕琨,熊华强. 基于伪并行遗传算法的配电网电容器优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(20):57-60.

- [6] 张伏生,李燕雷,汪鸿. 基于Tabu搜索算法的配电网电容器优化配置[J]. 电网技术,2003,27(4):72-75.
- [7] 胡海燕,刘健,武晓朦. 配电网低压侧自动无功补偿装置安装位置的优化规划[J]. 继电器,2004,32(19):21-25.
- [8] 杨洪,罗滇生,霍明. 基于SA-PSO的配电网电容器优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报,2009,31(3):111-114.
- [9] 胡瑛俊,章坚民,刘大业,等. 基于前推回代法和量测数据资源的多电源供电配电网线损计算[J]. 电力自动化设备,2009,33(12):43-47.
- [10] 徐华月,章坚民,王跃强. 基于CIM和配电网自动化系统的配网快速潮流计算[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(7):45-48.
- [11] 刘莉,王刚,翟登辉. k-means聚类算法在负荷曲线分类中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(23):65-73.
- [12] 蔡国伟,王大亮,王燕涛,等. 一种基于最短距离聚类与关联度分析的典型日选取新方法[J]. 中国电力,2008,41(4):15-18.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

张学军,陆献传,章坚民,等. 基于负荷持续模型的10 kV 配电线路无功优化配置[J]. 机电工程,2014,31(7):937-941.

ZHANG Xue-jun, LU Xian-chuan, ZHANG Jian-min, et al. 10 kV distribution line reactive optimal configuration based on load duration modeling[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(7):937-941.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn

(上接第936页)

参考文献(References):

- [1] 张生延. 可靠性预计中存在的问题及对策[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2006,24(1):49-51.
- [2] HUNG M H, CHEN K Y, HO R W, et al. Development of an e-diagnostics/maintenance framework for semiconductor factories with security considerations[J]. **Advanced Engineering Informatics**,2003,17(3):165-178.
- [3] 刘翔飞. 基于神经网络的数控系统可靠性预计[J]. 矿业科学技术,2005,33(1):12-18.
- [4] 黄瑞毅,杨少华,李坤兰,等. BP神经网络在元器件非工作可靠性参数预测中的应用[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2006,23(5):7-9.
- [5] NAKAJIMA S. Introduction to TPM: total productive maintenance[M]. Cambridge, MA: Productivity Press,1988.
- [6] SEMI. SEMI E79-0299. Standard for definition and measurement of equipment productivity[S]. Semiconductor e-

quipment and material international, Mt. View, CA,1999.

- [7] KOHONEN T. An introduction to neural computing[J]. **Neural networks**,1988,1(1):3-16.
- [8] ASSARZADEH S, GHOREISHI M. Neural-network-based modeling and optimization of the electro-discharge machining process[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**,2008,39(5-6):488-500.
- [9] ZHANG Z, FRIEDRICH K. Artificial neural networks applied to polymer composites: a review[J]. **Composites Science and technology**,2003,63(14):2029-2044.
- [10] YIN C, ROSENDAHL L, LUO Z. Methods to improve prediction performance of ANN models[J]. **Simulation Modelling Practice and Theory**,2003,11(3):211-222.
- [11] 朱磊,杨丹,吴映波. 基于BP神经网络的软件可靠性模型选择[J]. 计算机工程与设计,2007,28(17):4091-4093.

[编辑:李辉]