

分区电网低频低压减负荷优化分配算法

低频低压减负荷作为电网第三道防线的重要组成,对其动作的正确性、配置方案的合理性及控制策略的准确性都有非常严格的要求。根据电网的历史负荷数据,采用负荷曲线聚类分析及相关性计算方法,研究分区电网低频低压减负荷优化分配算法,形成低频低压减负荷的分配方案,并在电网的实际运行中进行应用,验证了算法的实效性。

罗建裕¹ 李海峰¹ 宁元元² 胡伟¹ 鲍有理³/1.江苏省电力公司 2.江苏华瑞泰科技股份有限公司 3.无锡供电公司



罗建裕/研究员级高工

随着电网的快速发展,交直流特高压以及大功率区外来电数量的增加和组成成分的复杂,以及供应的不确定性给电网安全稳定运行和电力电量平衡带来了新的问题和矛盾,也为电网调度和安全稳定运行带来了新的挑战。根据研究结果,一旦直流失去,频率会严重下降,对电网构成威胁。针对这些现状和特点,对电网第三道防线特别是低频低压减负荷装置动作的正确性、配置方案的合理性及控制策略的准确性都提出了非常严格的要求。

低频低压减负荷配置方案的合理与否,直接决定了电网在发生有功不足或无功缺额时的再平衡能力^[1, 3, 7]。因此,研究电网低频低压减负荷优化分配算法,优化低频低压减负荷的分配^[2],使其能跟踪电网的实时负荷以固定比例波动,保证随时具有满足要求的低频低压减负荷容量非常必要。

目前,地区电网的低频低压减负荷容量是根据上级调度下发的指标进行分配,然后再定期将执行的情况报告上级调度^[2]。上级调度下发的指标一般是按轮次下发比例值,由于每条负荷线路的

变化趋势各不相同,若要使分配的切除负荷容量能跟踪上总负荷的变化趋势并保持固定的比例,需要对负荷线路或负荷变电站的负荷变化趋势进行一些相关性研究。

针对以上问题,本文提出了低频低压减负荷优化分配算法,根据负荷线路的历史负荷数据,对负荷曲线相似度进行聚类分析^[4],生成满足指标要求的低频低压减负荷方案。本文仅从满足分配指标层面来研究优化分配方案,影响分配方案制定的其他因素不作研究叙述。

算法介绍

低频低压减负荷优化分配算法包含三方面内容:负荷聚类分析、负荷曲线相似度分析和生成优化分配方案。

1. 数据处理

现已从某市的调度系统平台获取了一年的历史负荷数据。原始数据为分钟级数据,其数据量大、线路多,在分析前要进行预处理。考虑到负荷的昼夜、季节等变化特征,将负荷数据分为日负荷和年负荷,日负荷数据间隔以小时为单位,将原始分钟级数据剔除坏数据后进行取平均形成小时数据,年负荷数据以天为单位,用小时数据取平均形成。同时为了便于分析,将负荷数据进行归一化处理,计算公式如下

$$\overline{P_{x,j}} = \frac{P_{x,j} - P_{x,j,\min}}{P_{x,j,\max} - P_{x,j,\min}} \quad (1)$$

式中, x 代表线路编号, $i \in [1, 2, \dots, 365]$ 表示天, $j \in [0, 1, \dots, 23]$ 表示小时, $P_{x,i,j,\max}$ 表示负荷线的年最大负荷,

关键词/Keywords

低频低压·
相关系数·
聚类分析·

$P_{x,i,j,\min}$ 表示负荷线的年最小负荷。

2. 聚类分析

电网内具有不同变化趋势的负荷线路组成了电网总负荷，为了拟合负荷线路与总负荷之间的变化趋势，形成优化的分配方案，需对众多的负荷线路进行聚类分析。划分方法是给定一个有 N 个元组或者纪录的数据集，分裂法将构造 K 个分组，每一个分组就代表一个聚类， $K < N$ 。而且这 K 个分组满足下列条件：

- 1) 每一个分组至少包含一个数据纪录。
- 2) 每一个数据纪录属于且仅属于一个分组。

对于给定的 K ，算法首先给出一个初始的分组方法，以后通过反复迭代的方法改变分组，使得每一次改进之后的分组方案都较前一次好，而所谓好的标准就是同一分组中的记录越近越好，而不同分组中的纪录越远越好。本文研究采用 K -MEANS均值算法^[6]，具体步骤如下：

- 1) 随机选取 K 个聚类质心点为 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_K, \mu_K \in R^n$ 。
- 2) 采用式 $c^{(i)} = \arg \min \|x^{(i)} - \mu_j\|^2$ 计算每一个样本 i 属于的类，对每一个类 j 采用式 $\mu_j = \frac{\sum_{i=1}^m 1\{c^{(i)} = j\} x^{(i)}}{\sum_{i=1}^m 1\{c^{(i)} = j\}}$ 重新计算其质心，重复以上计算直至收敛。

以某市1 000条10 kV负荷线路的负荷曲线为例，每条负荷线路的日负荷曲线包含24个数据点，年负荷曲线包含365个点。采用上述聚类方法对这些曲线进行聚类，根据文献[5]的聚类评价指标得到8类负荷曲线，如图1所示。

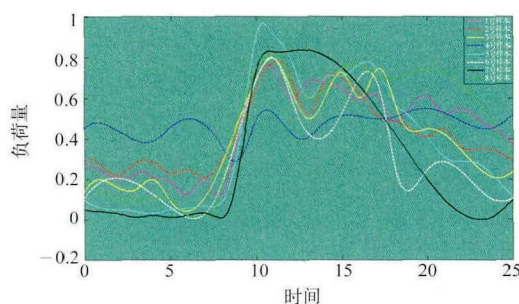


图1 负荷分类的曲线图

3. 曲线相关系数

相关系数用来衡量两个数据集合是否在一条

线上面，它用来衡量定距变量间的线性关系。当两个变量都是正态连续变量，而且两者之间呈线性关系时，表现这两个变量之间相关程度用积差相关系数，通常用 r 或是 ρ 表示，用来度量两个变量 X 和 Y 之间的相互关系（线性相关），取值范围在 $[-1, +1]$ 之间。

两个变量之间的相关系数可定义为这两个变量的协方差与二者标准差积的商，总体相关系数，一般用希腊字母 ρ 表示。

$$\rho_{XY} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (2)$$

采用样本计算的协方差和标准差代替总体的协方差和标准差，则为样本相关系数，一般用 r 表示，即

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

另外一个与式(3)等效的定义相关系数的公式是通过标准化以后变量均值的积定义的。假设样本可以记为 (X_i, Y_i) ，则样本相关系数为

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{S_X} \right) \left(\frac{Y_i - \bar{Y}}{S_Y} \right) \quad (4)$$

式中， $(X_i - \bar{X})/S_X$ ， $\bar{X}$ 和 S_X 分别为标准化变量，样本均值和样本标准差。相关系数的绝对值越大，相关性越强，相关系数越接近于1或-1，相关度越强，相关系数越接近于0，相关度越弱。

通常情况下通过表1所示取值范围判断变量的相关强度。

表1 相关系数对照表

相关性	负值	正值
不相关	-0.09~0.00	0.00~0.09
低相关	-0.3~-0.1	0.1~0.3
中等相关	-0.5~-0.3	0.3~0.5
显著相关	-1.0~-0.5	0.5~1.0

根据上述公式计算聚类得到的分类曲线与全市总负荷日曲线之间的相关系数曲线如图2所示，相关系数如表2所示。

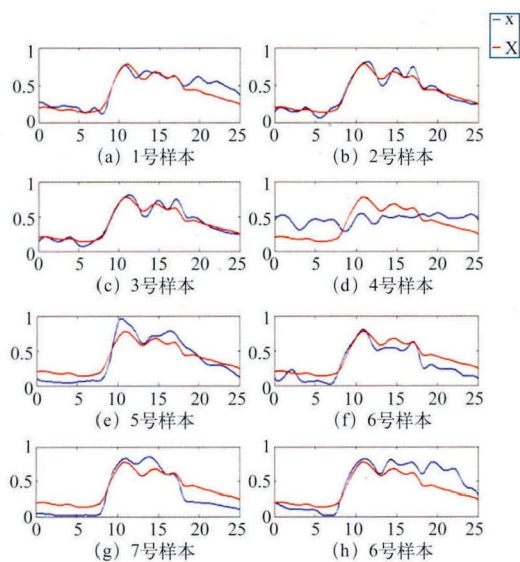


图2 8类负荷与总负荷之间曲线对比

表2 权重分配及误差表

分类	相关系数	权重	负荷量	误差 (%)
类1	0.25	0.102	99.7	-2.25
类2	0.52	0.187	190.2	1.71
类3	0.83	0.223	230.3	3.27
类4	0.19	0.094	95.1	1.17
类5	0.10	0.052	51.8	-0.38
类6	0.49	0.156	157.6	1.02
类7	0.37	0.131	132.9	1.45
类8	0.16	0.055	55.8	1.46

优化分配

总负荷是由聚类而得到的各分类负荷组合而成，对各分类负荷曲线加入权重组合后，计算其相关性，反复迭代找出最优的排列组合，使得切负荷方案的评价指标最优，评价指标在时间上应同时满足日负荷趋势和年负荷趋势，权重的设计可根据相关系数（见表2）生成。优化分配基本步骤如下：

- 1) 根据相关系数计算，各分类权重。
- 2) 根据权重按指标选择分类集合内的负荷线路，形成新的集合。
- 3) 计算新集合负荷曲线和总负荷曲线的相关系数。
- 4) 不显著相关则返回步骤2) 继续迭代至显著相关。

本文采用基于最小二乘法求解最佳权重系数 $w_i(t)$ ，令 e_{it} 为第 i 种方法模型在第 t 次的相关系数误差， S_t 为组合后第 t 次的误差平方和，即

$$e_{it} = y(t) - \hat{y}_i(t) \tag{5}$$

则 $w_i(t)$ 应使误差的平方和 S_t 最小。即

根据式（5）可得

$$e_{it} = y(t) - \hat{y}_i(t) = [e_{1t}, \dots, e_{mt}] \times [w_1(t), \dots, w_n(t)]^T \tag{6}$$

则 $e_{it}^2 = W_t^T A_t W_t$ 。其中， $W_t = [w_1(t), \dots, w_n(t)]^T$ ； $A_t = [e_{1t}, \dots, e_{mt}]^T [e_{1t}, \dots, e_{mt}]$ 。

由上式可变为

$$S_t = \sum_{i=1}^N e_{it}^2 = \sum_{i=1}^N W_t^T A_t W_t \tag{7}$$

由于权重系数均为非负数，故此问题转化为用线性规划方法求解下列方程的解。即

$$\begin{cases} \min S_t \\ R^T W_t = 1 \\ W_t \geq 0 \end{cases} \tag{8}$$

可求得

$$W_t = \frac{A_t^{-1} R}{R^T A_t^{-1} R} = [w_1(t), \dots, w_n(t)]^T \tag{9}$$

式中， $R = (1, \dots, 1)^T$ 为 N 维向量。

根据式（9）及以上理论分析可求得各分类的权重，根据指标及每个分类集合内负荷线路的负荷值，选择可切线路（见表2），在迭代过程中设置迭代次数的上限值，一般当迭代至9次时，误差已在接受的范围之内，迭代误差分析如图3所示。

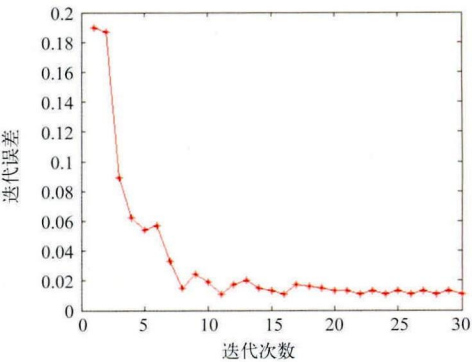


图3 迭代误差分析

应用效果

运用上述方法,本文对某市的所有负荷线路进行了历史数据的聚类分析和曲线相关性计算,并根据上级调度指标制定了低频低压减负荷的优化分配方案。

通过在地区的调度平台上安装服务器,运行相关软件,获取系统内所有负荷信息,实时监视低频低压减负荷的容量,并进行了评估预警。通过一段时间的监测,低频低压减负荷容量能跟踪上总负荷曲线的变化趋势并在固定的比例范围内浮动,效果如图4所示。

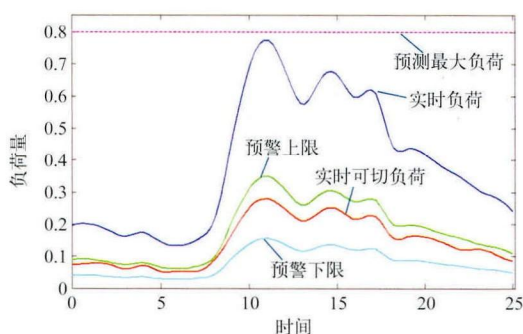


图4 效果图

结束语

本文所述的低频低压减负荷分配算法采用了负荷聚类分析、曲线相关性和最小二乘等算法,为优化低频低压减负荷的分配方案提供了一种有效的方法。经过在电网内的长期测试,证明本算法实用有效,在提高投运率方面起到了良好的效果。用此方法代替传统的人工分配不仅提高了科学性,也大大降低了人工成本。

参考文献

[1] DL 428—1991 电力系统自动低频减负荷技术规定

[S]. 1991.

[2] DL 497—1992 电力系统自动低频减负荷工作管理规程[S]. 1992.

[3] 孙光辉,沈国荣.加强电网三道防线确保我国电力系统的安全[C].中国科协2004年学术年会电力分会场暨中国电动机工程学会2004年学术年会论文集,2004:464-468.

[4] 何恒靖,解大,等.基于割集的电力系统低频减载同调分区算法[J].电力系统保护与控制,2010,38(9):12-18.

[5] 丁麒,王光增.地区电力用户负荷模式聚类分析应用[J].机电工程,2008,25(9):31-34.

[6] 张少敏,赵硕,王保义.基于云计算和量子粒子群算法的电力负荷曲线聚类算法研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(21):93-98.

[7] 杨博,解大,陈陈,等.电力系统低频减载的现状和应用[J].华东电力,2002,(9):14-18,72.

[8] 陈俊山,洪兰秀,郑志远.电力系统低频减载研究与应用发展[J].继电器,2007,35(14):79-82.

[9] 王冲,解大,陈陈,等.电力系统低频减载分析软件包的开发和应用[J].继电器,2004,32(13):55-58,67.

[10] 滕林,王刚,仇玉萍,等.安徽500 kV/220 kV电网分层分区的初步设想[J].华东电力,2006,34(11):56-58.

[11] 李莉,刘玉田,刘源祺.基于同调分析的电力系统极端紧急控制—解列与减载[C].中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十二届学术年会论文摘要集,2006:608-610.

(收稿日期:2014-10-02) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告