

不平衡负载的一种更加经济的补偿方法

傅军栋¹, 喻勇¹, 黄来福²

(1. 华东交通大学电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 针对低压配电网不平衡负载降损的问题, 会联想到电容补偿器, 其在供电系统中起到提高电网的功率因数与降低供电变压器及输送线路的损耗, 提高供电效率以及改善供电环境的作用。传统方法只需计算出负载所需要补偿的导纳值, 然后配置相应的电容器, 比较新的一种导纳值计算方法如平衡分量法。提出一种“线路调整法”的降损补偿方法, 进行负荷三相平衡线路调整, 仅需对用户集表箱的接入相做调整。提出一种基于优化算法的智能换相策略, 不需要增加额外投资, 通过算例分析验证了此方法的正确性和有效性。因此, “线路调整法”是一种更简单、更经济的降损方法。

关键词: 无功补偿; 不平衡负载; 线路调整法; 三相不平衡度; 负荷电流

A more economical compensation method for unbalanced load

FU Jundong¹, YU Yong¹, HUANG Laifu²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: For low-voltage distribution network unbalanced load loss reduction, we think of the capacitance compensation, which can improve the power factor of power grid and reduce the loss of power transformers and transmission lines, as well as improve the efficiency of power supply improvement and environment in the power supply system. Traditional methods simply calculate the admittance compensation value required by the load, then configure the appropriate capacitor; a relatively new kind of admittance calculation method is the balance component method. This paper puts forward a "Line Adjustment Act" drop loss compensation method to perform three phase load line regulation, which only adjusts the access phase of users' meter box. A commutation strategy based on intelligent optimization algorithm is proposed, which does not require additional investment, and through a numerical example, the validity and effectiveness of this method are verified. Therefore, the "Line Adjustment Act" is a more simple and more economical method of reducing loss.

Key words: reactive power compensation; unbalanced load; Line Adjustment Act; three phase unbalance; load current

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)02-0126-07

0 引言

低压配电网一般采用三相四线制供电, 大部分为单相负载, 由于用电的不同时性、阻抗角不同等因素均会造成供电系统三相负载的不平衡^[1-2]问题的发生, 而用户端三相负载长期在不平衡状态下运行对供电系统及用户将会造成一系列的危害^[3]。国家电网公司配电网在运行规程中规定: 配电变压器的不平衡度不应大于 15%, 中性线电流不应超过额定电流的 25%。在配电网中安装并联电容器, 可提高电压质量、降低网损、改善功率因数^[4]。因此, 对三相不平衡负荷进行平衡化补偿, 无论对供电系统还是用户都十分重要。

并联电容器的降损方法一般根据负载所需的补偿导纳, 配置相应的电容补偿器, 文献[5]提出的不平衡负载的平衡分量法分解及补偿方法能快速准确地计算出三相并联补偿导纳值。文献[6]根据相电压和线电压的大小分别来计算电压不平衡度, 以此作为目标函数来建立数学模型, 最终利用补偿装置对系统的功率因数和不平衡度进行优化。文献[7]利用对称分量法推导出线电流和电压表示的补偿电纳的公式, 根据补偿电纳进一步推算出所需的补偿电容值。文献[8-10]也都是在补偿导纳上进行研究, 通过无功补偿装置, 可以在一定程度上可以减少配电变压器三相不平衡度, 但是对电网会产生负面影响, 比如补偿电容对谐波电流具有放大作用, 装置的补

偿控制策略能否适应不同性质用户的用电需求, 以及装置的适用性和经济性的问题还有待做进一步深入研究。

文献[11]开发了一套低压配电网降损辅助决策系统, 文章通过遗传算法建立数学模型, 通过生物学中的选择、交叉、变异的原理, 得出一个科学合理的负荷优化配置方案。此方案的最大优点是不需要增加额外的投资, 仅需将用户的接入相做调整即可, 但其系统不开放, 适用性不强。本文提出一种在 java 语言下, 基于遗传算法的一种“线路调整法”, 相比传统利用电容补偿器的方法, 该方法优点是不需要增加额外投资, 只需对用户的接入相做调整即可。此方法利用 java 语言作为编程语言, 程序设计基于 Eclipse VE 开发环境, 可以实现可视化编程, 方便快捷, 图形界面友好、操作简便、功能强大。

1 电容补偿方法

供电企业为了提高电能质量而提高功率因数^[12], 通过无功功率的发生装置来补偿用电设备所需的无

功功率^[13-15], 以提高其功率因数, 称为提高功率因数的补偿方法。采用补偿法来提高功率因数, 必然会增加有色金属的消耗和新电气设备的消耗。此外, 补偿设备本身也会有功率损失, 所以首先应该采取提高用电设备自然功率因数的方法。当功率因数还是达不到《电力设计技术规范》标准时, 则需采用专门的补偿设备来提高功率因数。如配置合适的移相电容器, 首先要计算出补偿所需导纳, 文献[3, 5]已经对此作了非常详细的阐述, 本文不再赘述。

2 “线路调整法”补偿方法

“线路调整法”主题为绿色环保, 不需要增加额外投资, 只需调整用户所在相线。配合可视化界面, 通过 java 语言在 Elcipse VE 开发环境下编写可视化程序, 搭建了人机交互的友好窗口, 操作简便、功能强大。以中性线电流作为目标函数, 提出治理配电变压器三相不平衡的方法和措施, 如图 1 所示为低压配电系统三相不平衡控制原理图。

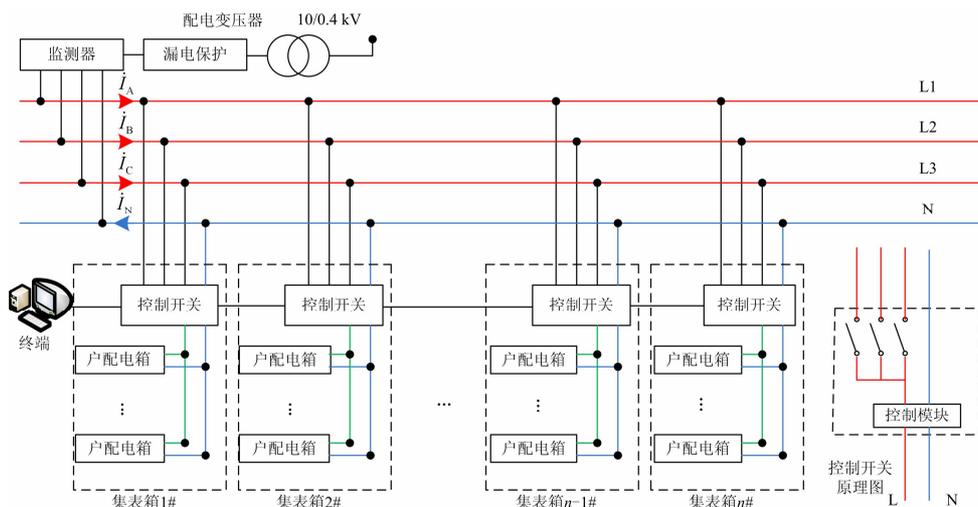


图 1 控制原理图

Fig. 1 Schematic of control

监测器采集各相总电流和中性线电流数据, 通过 A、B、C 三相的总电流即可计算出中性线上的电流 i_N , 根据节点的接入相获取用户负载信息, 执行配电变压器平衡控制策略, 选出最佳的负荷分配方案。通过换相, 使中性线电流降低, 减轻系统中三相电流不平衡危害的影响, 提高电力系统的稳定性, 保证用户的用电安全。要建立模型, 首先必须采集模型所需的数据, 如流入各用户端的电流以及在同一相线(A 或 B 或 C)上所有用户的总电流。

3 模型建立

3.1 java 遗传算法程序设计

(1) 初始化种群。采用二进制编码, 初始化一条染色体, 返回一个长度为 GENE 的染色体。然后再初始化一组染色体, 返回一个染色体组。

(2) 解码。通过集表箱数 n , 比如集表箱数为 9, 采用 45 位二进制编码, 平均分配二进制数, 则每 5 位二进制代表一个集表箱, 将二进制转换成十进制数, 因为三相电路只有三相, 因此将十进制数平均

分成三份，然后根据概率均匀分布，集表箱所在相线由这些二进制码决定。

$$\mu = \frac{D_n}{2^m - 1} \tag{1}$$

式中： μ 为[0, 1]均匀分布区间内的随机数； D 为第 n 集表箱的 m 位二进制数转换成十进制的值；当 $0 \leq \mu < \frac{1}{3}$ 代表单相负荷接入 A 相；当 $\frac{1}{3} \leq \mu < \frac{2}{3}$ 代表单相负荷接入 C 相；当 $\frac{2}{3} \leq \mu < 1$ 代表单相负荷接入 B 相。

(3) 适应度函数。由图 1 可知， $i_N = i_A + i_B + i_C$ ，其中 i_A 、 i_B 、 i_C 分别为 A、B、C 相上的线电流， $i_N = \frac{\dot{U}_{AN}}{Z_A} + \frac{\dot{U}_{BN}}{Z_B} + \frac{\dot{U}_{CN}}{Z_C}$ ，其中 \dot{U}_{AN} 、 \dot{U}_{BN} 、 \dot{U}_{CN} 分别为接在 A、B、C 相上的相电压； Z_A 、 Z_B 、 Z_C 为对应的负载阻抗。则

$$I_N = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n I_i \cos(\theta_i - \phi_i) \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^n I_i \sin(\theta_i - \phi_i) \right]^2} \tag{2}$$

式中： I_N 为中性线电流； I_i 为流入第 i 个集表箱的电流； θ_i 为第 i 个集表箱所在相对应的角度； ϕ_i 为第 i 个集表箱所有用户的负载阻抗角。

(4) 选择。选择是从之前的种群中以一定的概率选择优秀的个体，从而得到一个新的种群。个体适应度值越大，被选中的概率越大。本文采用轮盘赌法，个体 i 被选中的概率为

$$p_i = F_i / \sum_{j=1}^N F_j \tag{3}$$

式中： F_i 为个体 i 的适应度值； N 为种群个体数目。

(5) 交叉。把父代的优质特性遗传给子代，经过两个染色体的交叉互换后，从而产生新的优质个体，以一定的概率，选择两条染色体进行交叉互换。

(6) 变异。变异的主要目的是保持种群多样性。变异操作是从种群中随机选取一个染色体，选择染色体中的某一位置进行变异，以产生更加优质的染色体。

3.2 java GUI 程序设计

图形化界面是当今计算机程序与用户之间的主流接口，为搭建人机交互的友好平台，本文可视化界面的编程基于 Eclipse VE 开发环境，采用 SWT(Abstract Windowing Toolkit)开发包，SWT 上手速度要快一些。因为 SWT 的 API 类似于传统的 GUI 工具，这使得许多从传统 GUI 工具中转过来的程序员很容易上手。传统 GUI 工具系统尤其是 Windows 平台的，基于消息映射机制，其基本模型是面向过程和面向消息。Swing 的设计思想是基于面向对象的典范，其 MVC 模式是程序设计模式的经典。

4 仿真分析

本文以华东交通大学学生 B 区变电所为研究对象，其中包含学生公寓、学生食堂、体育馆、南区大学生活动中心等 22 栋楼，每栋楼都装有一个集表箱，集表箱前面装设控制开关，控制开关的作用主要是根据所建立的数学模型，对三相负荷进行自动的平衡调整，通过自动切换用户的相序，减小三相电流不平衡带来的危害，使电网平稳运行，提高供电质量。由于篇幅有限，图 2 和表 1 只给出几种代表性的建筑 2014-02-26 日一整天电表能耗明细及 1#2#女生宿舍电表能耗明细报表，数据来自华东交通大学智能节约型校园能耗监管平台。

从图 2 可以获知一整天所有建筑的能耗情况，根据不同建筑类型，可以很清楚地看到其内部作息时间情况，这一天风雨球场是没有耗电的；第四食堂的能耗比较均匀；学生宿舍主要在早上 8 点到凌晨 1 点时段耗电；商业建筑在晚上耗电比较多；校园公共场所白天耗电比较大。

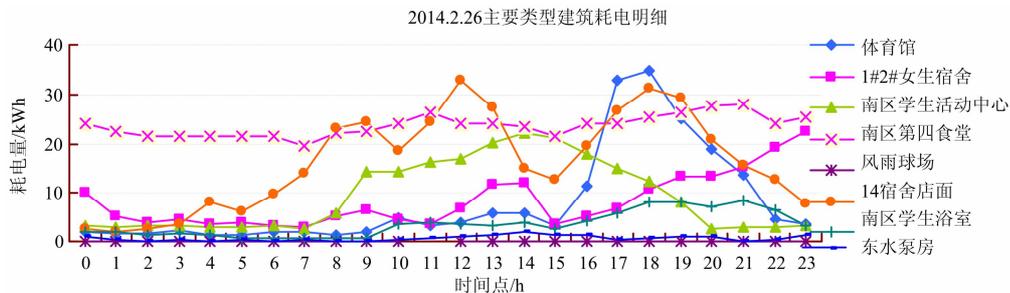


图 2 建筑耗电明细

Fig. 2 Details of the construction consumption

由于低压台区功率数据比较容易获取，因此把 各相平均有功作为不平衡调整依据^[16]，可以得到平

均负荷电流。

$$I_n = \frac{A_n}{U_n \cos \phi_n T} \quad (4)$$

式中： I_n 为流入第 n 个集表箱的分相平均负荷电流； U_n 为第 n 个集表箱的平均相电压； ϕ_n 为第 n 个集表箱用户端平均阻抗角； A_n 为第 n 个集表箱计算时间内分相有功用电量； T 为计算时间，由于华东交通大学智能节约型校园能耗监管平台数据是每小时采集一次，所以时间 T 为 1 h，表 2 为原先集表箱

所处相线统计表。

4.1 java GUI 实现

本文共有 22 栋不同类型的建筑，为确保精度，采用 110 位二进制数进行编码，每 5 位二进制数代表一个集表箱。设计界面如图 3 所示，由于篇幅有限，只给出三张界面图。

点击“三相平衡计算”按钮，系统将会按照“线路调整法”的思想，进行科学合理的负荷重新分配，寻找适应度值最大的个体，图中分配方案文本框中 0 表示集表箱调整到 A 相；2.094 4 表示 $2\pi/3$ ，表示集表箱调整到 B 相；-2.094 4 表示 $-2\pi/3$ ，表示

表 1 1#2#女生宿舍电表能耗明细报表
Table 1 1 # 2 # dormitory energy meter detail report

名称	设备编码	起始示数/kWh	结束示数/kWh	时间点	实际用量/kWh
1#2#女生宿舍	12002003	74 124	74 134	00:00	10
1#2#女生宿舍	12002003	74 134	74 139.2	01:00	5.2
1#2#女生宿舍	12002003	74 139.2	74 143.2	02:00	4
1#2#女生宿舍	12002003	74 143.2	74 147.6	03:00	4.4
1#2#女生宿舍	12002003	74 147.6	74 151.2	04:00	3.6
1#2#女生宿舍	12002003	74 151.2	74 155.2	05:00	4
1#2#女生宿舍	12002003	74 155.2	74 158.4	06:00	3.2
1#2#女生宿舍	12002003	74 158.4	74 161.2	07:00	2.8
1#2#女生宿舍	12002003	74 161.2	74 166.4	08:00	5.2
1#2#女生宿舍	12002003	74 166.4	74 172.8	09:00	6.4
1#2#女生宿舍	12002003	74 172.8	74 177.2	10:00	4.4
1#2#女生宿舍	12002003	74 177.2	74 180.8	11:00	3.6
1#2#女生宿舍	12002003	74 180.8	74 187.6	12:00	6.8
1#2#女生宿舍	12002003	74 187.6	74 199.2	13:00	11.6
1#2#女生宿舍	12002003	74 199.2	74 211.2	14:00	12
1#2#女生宿舍	12002003	74 211.2	74 214.8	15:00	3.6
1#2#女生宿舍	12002003	74 214.8	74 220	16:00	5.2
1#2#女生宿舍	12002003	74 220	74 226.8	17:00	6.8
1#2#女生宿舍	12002003	74 226.8	74 237.6	18:00	10.8
1#2#女生宿舍	12002003	74 237.6	74 250.8	19:00	13.2
1#2#女生宿舍	12002003	74 250.8	74 264	20:00	13.2
1#2#女生宿舍	12002003	74 264	74 279.2	21:00	15.2
1#2#女生宿舍	12002003	74 279.2	74 298.4	22:00	19.2
1#2#女生宿舍	12002003	74 298.4	74 320.8	23:00	22.4

表 2 调整之前集表箱相线统计

Table 2 Phase line statistics of meter box before adjustment

集表箱	相线	集表箱	相线	集表箱	相线	集表箱	相线
体育馆	C	学生浴室	C	7#宿舍	B	13#宿舍	B
东水泵房	C	1#2#宿舍	A	8#宿舍	B	14#宿舍	C
活动中心	B	3#宿舍	A	9#宿舍	B	15#宿舍	C
第四食堂	A	4#6#宿舍	A	10#宿舍	B	研究生楼	C
风雨球场	C	4#一楼	A	11#宿舍	B	--	--
14#店面	B	5#宿舍	A	12#宿舍	B	--	--

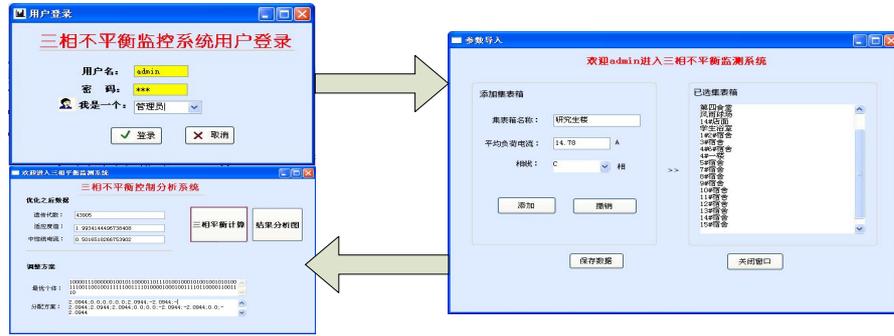


图 3 java GUI 界面

Fig. 3 Interface of java GUI

集表箱调整到 C 相。点击“结果分析图”按钮，系统则会将运行结果以图表的形式形象地展示给用户，图 4 为三相不平衡监控系统流程图。

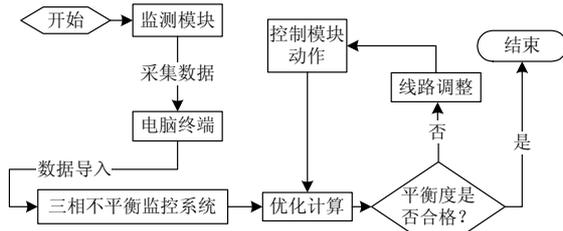


图 4 三相不平衡监控系统流程图

Fig. 4 Flow chart of three-phase unbalanced monitoring system

4.2 结果分析

图 5 为调整前后各平均负荷电流走势图。

三相不平衡度^[17-18]的估算是贯彻国家标准、提

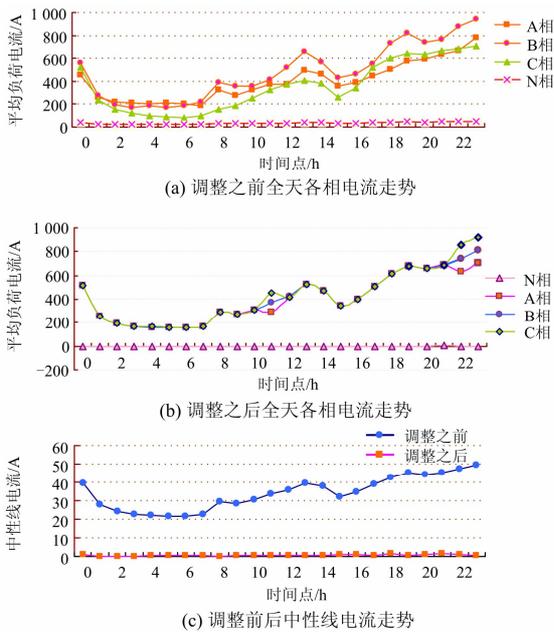


图 5 调整前后各平均负荷电流走势图

Fig. 5 Average load current chart before and after adjustment

高电能质量的基础，用户端在不平衡状态下运行时，每相总负荷电流为 I_A 、 I_B 、 I_C ，平均负荷电流为

$$I_{av} = (I_A + I_B + I_C) / 3 \quad (5)$$

则负荷电流不平衡度及 A、B、C 三相的相不平衡度定义为

$$\lambda\% = \frac{I_{\max\phi}}{I_{av}} \times 100\% \quad (6)$$

$$\lambda_n\% = \frac{I_n - I_{av}}{I_{av}} \times 100\% \quad (n = A, B, C) \quad (7)$$

式中： λ 为负荷电流不平衡度； $I_{\max\phi}$ 为最大偏差电流， $I_{\max\phi} = \max\{|I_A - I_{av}|, |I_B - I_{av}|, |I_C - I_{av}|\}$ ； λ_n 为对应相的不平衡度； I_n 为对应相的总负荷电流。调整前后不平衡度变化曲线如图 6 所示。

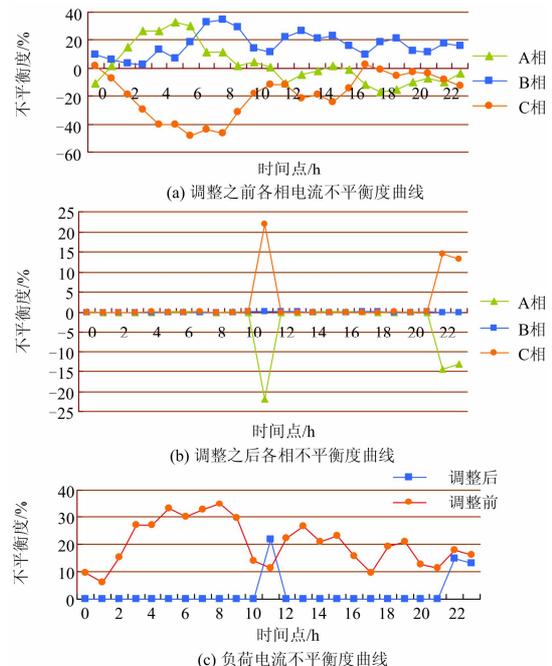


图 6 调整前后不平衡度变化曲线

Fig. 6 Imbalance change curve before and after adjustment

通过仿真结果可以看出,调整前后差别很明显,调整前负荷电流不平衡度最高达到了 34.66%,而且大部分在 20%左右;相反,调整后大部分情况下都处在规范所规定的范围内。只有在这一天的 11 点时候出现过一次超出 20%的情形。调整后各相电流不平衡度较之前也有非常显著的改善。调整后效果明显,系统处在一个更加稳定,更加经济的状态下运行。

将电网用户端各相相关的数据导入到三相不平衡监控系统中,就能够得到一个经济的相序调整方案。将华东交通大学北 630 变电所总表的数据导入系统中,发现调整前负荷电流不平衡度最高达到了 42.53%,而且大部分在 24%左右;调整之后几乎为 0。类似地,再将给排水楼配电房总表所监测的数据导入系统,发现结果同样得到了非常显著的改善,验证了这个系统的有效性和广泛性。

5 结语

根据以上分析可知,通过“线路调整法”对系统进行科学有效的调整之后,供电和用电系统三相不平衡问题得到了非常大的改善,调整后不论是各相电流,还是负荷电流,其不平衡度显著减少,最终更好地实现了三相负荷的平衡。目前国际上针对三相不平衡问题通用做法是购置无功补偿装置,对不平衡系统进行无功补偿。但是一般来讲装置都比较昂贵,投入成本很大,占地面积也大;而采用“线路调整法”,即可以不购置昂贵补偿设备,同时还能够最大限度地减少配电不平衡运行所带来的损耗,能够确保绝大部分时间配变运行在允许的范围内。地球资源是有限的,节约能源必须从现在做起,本研究对供电部门响应国家号召,做到节约能源具有非常大的参考价值。

参考文献

- [1] 张五一, 张言滨, 刘华伟. 配电网三相负荷不对称的线损分析[J]. 继电器, 2007, 35(7): 24-27.
ZHANG Wuyi, ZHANG Yanbin, LIU Huawei. Circuit loss analysis of three-phase unbalanced circuit in distribution network[J]. Relay, 2007, 35(7): 24-27.
- [2] 潘志, 李湘华, 陈岳. 三相不平衡负荷的管理和降损技术研究[J]. 电力学报, 2012, 27(2): 127-131.
PAN Zhi, LI Xianghua, CHEN Yue. Management of the three-phase imbalanced load and study on the technology of line loss dropping[J]. Journal of Electric Power, 2012, 27(2): 127-131.
- [3] 杨云龙, 王凤清. 配电变压器三相不平衡运行带来的附加损耗—电压偏差及补偿方法[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 73-76.
YANG Yunlong, WANG Fengqing. Additional loss and voltage deviation caused by unbalanced operation of distribution transformer and countermeasures[J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 73-76.
- [4] 胡泽春, 钟明明, 王佳贤, 等. 考虑多负荷水平的中低压配电网无功补偿优化规划[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 167-173.
HU Zechun, ZHONG Mingming, WANG Jiaxian, et al. Optimal reactive power compensation for medium and low voltage distribution network considering multiple load levels[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 167-173.
- [5] 胡应宏, 王建曠, 任佳佳, 等. 不平衡负载的平衡分量法分解及补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 34(32): 89-105.
HU Yinghong, WANG Jianze, REN Jiajia, et al. Balance component decomposition and compensation method for unbalanced load[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 34(32): 89-105.
- [6] 魏秀明. 电能质量的三相不平衡问题的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012: 17-40.
WEI Xiuming. Study of three-phase power quality imbalance of electricity[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012: 17-40.
- [7] 李心广, 赖声礼, 秦华标, 等. 电网的无功及三相不平衡综合补偿研究[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 30-33.
LI Xinguang, LAI Shengli, QIN Huabiao, et al. An approach of integrated compensation for reactive power and three phase unbalance[J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 30-33.
- [8] 同向前, 王海燕, 尹军. 基于负荷功率的三相不平衡度的计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(2): 24-30.
TONG Xiangqian, WANG Haiyan, YIN Jun. Calculation method of three-phase unbalance factor based on load power[J]. Proceeding of the CSU-EPSSA, 2011, 23(2): 24-30.
- [9] 韦钢, 陈森环, 蔡阳, 等. 基于瞬时无功功率理论的三相不平衡负荷补偿[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 56-63.
WEI Gang, CHEN Senhuan, CAI Yang, et al. Compensation for three-phase unbalanced load based on instantaneous reactive power theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 56-63.
- [10] 雷志涛, 唐云峰. 新型三相不平衡负荷无功补偿算法[J]. 电力电子技术, 2010, 44(10): 48-50.
LEI Zhitao, TANG Yunfeng. A new algorithm of

- unbalanced three-phase load compensation[J]. Power Electronics, 2010, 44(10): 48-50.
- [11] 马旭冰. 低压配电网降损辅助决策系统的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
MA Xubing. Research on low voltage distribution network reducing loss decision-making system[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012.
- [12] 刘健, 段璟靓. 配电网极限线损分析及降损措施优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 27-35.
LIU Jian, DUAN Jingjing. Line loss limitation analysis and optimal planning of loss reduction for distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 27-35.
- [13] 李斌, 李学斌, 丁茂生, 等. 特高压同杆双回线的环流不平衡及其影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 202-223.
LI Bin, LI Xuebin, DING Maosheng, et al. Circulating unbalanced current and its influence of double-circuit UHV transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 202-223.
- [14] 张占龙, 王科, 李德文. 变压器谐波损耗计算及影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 68-78.
ZHANG Zhanlong, WANG Ke, LI Dewen. Transformer harmonic loss calculation and influence factor analysis[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 68-78.
- [15] 冀鲁豫, 吴俊勇, 孙建华, 等. 电力系统谐波与不平衡分布的计算方法与实现[J]. 电工技术学报, 2011, 26(增刊 1): 70-73.
JI Luyu, WU Junyong, SUN Jianhua, et al. Calculation method and realization of harmonics and unbalance distribution in power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(S1): 70-73.
- [16] 李峻, 刘一涛, 陈菊红. 低压三相不平衡调整优选方案的计算机实现[J]. 电气安全, 2013, 32(21): 55-67.
LI Jun, LIU Yitao, CHEN Juhong. Low phase imbalance adjustment to achieve a preferred embodiment of the computer[J]. Electric Safety, 2013, 32(21): 55-67.
- [17] 海涛, 闭耀宾, 骆武宁, 等. 准同期并网中三相不平衡问题的优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 70-73.
HAI Tao, BI Yaobin, LUO Wuning, et al. Optimized strategy of three-phase unbalance in synchronized grid-connected[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18): 70-73.
- [18] 周林, 张有玉, 刘强, 等. 三相不平衡度算法的比较研究[J]. 华东电力, 2010, 38(2): 210-215.
ZHOU Lin, ZHANG Youyu, LIU Qiang, et al. Comparative study of three-phase unbalance algorithm[J]. East China Electric Power, 2010, 38(2): 210-215.

收稿日期: 2014-04-17; 修回日期: 2014-05-23

作者简介:

傅军栋(1972-), 男, 副教授, 研究生导师, 主要从事电力系统、建筑电气及智能化研究。E-mail: 755915@qq.com