

# 引入三相不平衡度的低压电网理论线损计算

郭 峰<sup>1</sup>, 姚莉娜<sup>2</sup>, 刘 恒<sup>3</sup>, 吴珊珊<sup>3</sup>

- (1. 福建省电力勘测设计院 线路设计部,福建 福州 350003;  
 2. 郑州轻工业学院 电气信息工程学院,河南 郑州 450002;  
 3. 西安理工大学 电气工程系,陕西 西安 710048;)

**摘要:** 提出采用均方根电流法计算低压电网理论线损,通过分析三相不平衡线路的线损,推导出线损与不平衡度的关系公式,并将该公式用于三相不平衡配电线路的理论线损计算。系统引入三相不平衡度采集装置,以单片机为主控制芯片,给出了系统结构框图。在采集三相电流时,使用该采集装置挂接在变压器出口端,定时实时采集和存储三相电流,以供计算三相不平衡度。以某台区实际运行为研究实例,介绍了计算步骤,计算结果表明所提出的计算系统是可行的。

**关键词:** 三相不平衡线路; 线损率; 不平衡度

中图分类号: TM 744

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)11-0051-04

线损率是表征电力工业经济效益和技术管理水平的综合性指标<sup>[1]</sup>。目前,低压配电网的运行优化和降损措施已成为供电企业极为关注的问题,它对供电企业的合理投资和经济效益的提高具有重要意义<sup>[2]</sup>。

目前,常用的低压电网理论线损计算方法主要有均方根电流法、平均电流法、最大电流法、等值电阻法、最大负荷损失小时数法等<sup>[3-7]</sup>。这里采用均方根电流法进行低压电网理论线损计算。当前,也有一些可视化的低压线损计算系统<sup>[8-11]</sup>,但其计算效果都或多或少存在一些不足。本系统引入了三相不平衡度采集装置,使得计算结果能较好地贴近实际值。

## 1 均方根电流法计算原理

采用均方根电流法计算低压电网理论线损的基本原理是<sup>[3-5]</sup>:各支路日损耗有功电量( $\Delta W_i$ )由可变损耗( $\Delta W_{ki}$ )和固定损耗( $\Delta W_{gi}$ )组成,其计算公式为

$$\Delta W_i = \Delta W_{ki} + \Delta W_{gi} \quad (1)$$

台区总的日损耗有功电量( $\Delta W$ )计算公式为

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n \Delta W_i \quad (2)$$

式中  $n$  为支路总数。

各支路的可变损耗( $\Delta W_{ki}$ )计算公式为

$$\Delta W_{ki} = I_{jfabcoi}^2 R_i t \times 10^{-3} (\text{kW}\cdot\text{h}) \quad (3)$$

其中  $I_{jfabcoi}$  为各支路各相的均方根电流,其计算公式为

$$I_{jfi} = I_{jfr} \frac{W_f}{W_\Sigma} \quad (4)$$

其中,  $W_f$  为分路电量,  $W_\Sigma$  为总电量;  $I_{jfr}$  指台区变压器出口处的均方根电流,其计算公式为

$$I_{jfr} = \sqrt{\sum_{i=1}^{24} I_i^2 / 24} \quad (5)$$

其中  $I_i$  指台区变压器出口处相电流采样值(该公式中选择每日采样 24 个点,即每小时采样一次,在工程实际中可加大采样次数以提高计算精度)。

各支路电阻的计算公式为

$$R_i = l_i r_{0i} \quad (6)$$

其中  $l_i$  指各支路长度,  $r_{0i}$  指各支路的单位电阻值。

各支路的固定损耗( $\Delta W_{gi}$ )包括低压电容器、电流互感器、电压互感器、三相电表、单相电表的损耗。

## 2 三相不平衡对网损的影响

三相负荷不平衡时,各相的负荷电流不相等,就在相间产生了不平衡电流,这些不平衡电流除在相线上引起损耗外,还将在中性线上引起损耗,增加了总的线损<sup>[4-5]</sup>。

如果三相负荷平衡,则向量差为零,即

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad (7)$$

假设某三相四线制线路总负荷为  $3I$ , 相线及中性线电阻皆为  $R$ , 则三相平衡时线路功率损耗为

$$\Delta P_b = 3I^2 R \quad (8)$$

若三相不平衡,假设某相负荷为  $2I$ , 另 2 相分别为  $0.5I$ , 则中性线电流为

$$I_N = 2I + \frac{1}{2}I \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) + \frac{1}{2}I \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{3}{2}I \quad (9)$$

功率损耗为

$$\Delta P_{unb} = \left[ (2I)^2 + \left( \frac{1}{2}I \right)^2 + \left( \frac{1}{2}I \right)^2 + \left( \frac{3}{2}I \right)^2 \right] \times R = \frac{27}{4}I^2 R \quad (10)$$

与平衡时相比,功率损耗增加了 1.25 倍,可见三相不平衡造成线损显著增大,极端情况下,全部负荷由一相供电,功率损耗为

$$(3I)^2 \times R \times 2 = 18I^2 R$$

是三相平衡时的 6 倍,增大了 5 倍。

由于调整三相负荷使之趋于平衡几乎不需要增加投资,因此应将它作为首先采取的降损措施。

### 3 线损与不平衡度的关系

负荷电流不平衡度的一般定义为

$$\beta = \frac{I_{\max\phi} - I_{av}}{I_{av}} \times 100 \% \quad (11)$$

$$\beta_A = \frac{I_{\max A} - I_{av}}{I_{av}} \times 100 \% \quad (12)$$

$$\beta_B = \frac{I_{\max B} - I_{av}}{I_{av}} \times 100 \% \quad (13)$$

$$\beta_C = \frac{I_{\max C} - I_{av}}{I_{av}} \times 100 \% \quad (14)$$

其中  $I_{\max\phi}$  为最大相负荷电流;  $I_{\max A}$ ,  $I_{\max B}$ ,  $I_{\max C}$  指三相负荷最大电流。 $I_{av}$  指平均负荷电流,且  $I_{av} = (I_A + I_B + I_C) / 3$ 。

相不平衡度概念:

$$\beta_\phi = \frac{I_\phi - I_{av}}{I_{av}} \times 100 \% \quad (15)$$

其中,  $I_\phi$  指相电流。

显然  $I_\phi = (1 + \beta_\phi) I_{av}$ ,由于  $I_\phi$  的取值范围为 0~3  $I_{av}$ ,所以  $\beta_\phi$  的变化范围是 -1~2,且存在以下关系:

$$\beta_A + \beta_B + \beta_C = 0 \quad (16)$$

假定三相四线制线路的相线电阻与中性线电阻皆为  $R$ ,各相功率因数相同,则三相不平衡时,相线的功率损耗为

$$\Delta P_\phi = [(1 + \beta_A)^2 + (1 + \beta_B)^2 + (1 + \beta_C)^2] I_{av}^2 R \quad (17)$$

即

$$\Delta P_\phi = (3 + \beta_A^2 + \beta_B^2 + \beta_C^2) I_{av}^2 R \quad (18)$$

中性线电流为

$$I_N = (1 + \beta_A) I_{av} + (1 + \beta_B) \left( -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) I_{av} + (1 + \beta_C) \left( -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) I_{av} \quad (19)$$

则

$$I_N^2 = \left[ \left( \beta_A - \frac{1}{2} \beta_B - \frac{1}{2} \beta_C \right)^2 + \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \beta_C - \frac{\sqrt{3}}{2} \beta_B \right)^2 \right] I_{av}^2 \quad (20)$$

整理得:

$$I_N^2 = (\beta_A^2 + \beta_B^2 + \beta_C^2 - \beta_A \beta_B - \beta_B \beta_C - \beta_C \beta_A) I_{av}^2 \quad (21)$$

中性线上的功率损耗为

$$\Delta P_N = I_N^2 R \quad (22)$$

所以总损耗为

$$\Delta P_{unb} = \Delta P_\phi + \Delta P_N = [3 + 2(\beta_A^2 + \beta_B^2 + \beta_C^2) - (\beta_A \beta_B + \beta_B \beta_C + \beta_C \beta_A)] I_{av}^2 R \quad (23)$$

若将三相不平衡时的线损增加率定义为

$$r = \frac{\Delta P_{unb} - \Delta P_b}{\Delta P_b} \times 100 \% \quad (24)$$

则

$$r = [2(\beta_A^2 + \beta_B^2 + \beta_C^2) - \beta_A \beta_B - \beta_B \beta_C - \beta_C \beta_A] / 3 \quad (25)$$

将  $\beta_C = -\beta_A - \beta_B$  代入上式,进一步简化为

$$r = 5(\beta_A^2 + \beta_B^2 + \beta_A \beta_B) / 3 \quad (26)$$

### 4 三相不平衡度的采集

本系统在采集三相电流时,使用单独的硬件设备挂接在变压器出口端,每隔 1 h 实时采集和存储三相电流,以供计算三相不平衡度使用。硬件系统采用美国 Silicon 公司的高性能增强型 C8051F 单片机作为主控制芯片,通过串行外围接口(SPI)扩展了实时时钟芯片 DS1305 以提供定时采样功能,通过内部整合电路(IIC)接口扩展了 EEPROM 存储芯片 AT24C512,可存储长达一年的电流数据。因 C8051F 芯片内部带有 8 通道 12 位精度的 A/D 转换器,完全可以满足本应用的需要。同时,该硬件系统采用了现有的 U 盘模块,在提取采样数据时只需将 U 盘插入通用串行总线(USB)口,系统便可将历史采样数据下载到该 U 盘中,存成专用的数据文件(如 \*.txt),将该文件录入后台计算程序,后台系统便可自行进行数据文件的分析与读取,从而完成三相不平衡度的计算。系统电流采集结构框图如图 1 所示。



图 1 系统结构框图

Fig.1 Block diagram of acquisition unit

### 5 应用算例

以陕西省某实际运行台区作为研究实例,其实际网络拓扑图如图 2 所示。

2006 年 3 月该台区总电量为 4903.3537 kW·h,线路参数、负荷参数、固定损耗参数以及电流数据(典型日 2006 年 3 月 15 日)如表 1 所示。

计算步骤如图 3 所示。其中电量归结后各个负荷参数见表 2,固定损耗参数见表 3,电流数据见表 4,线路损耗的计算结果如表 5 所示。

台区总损耗为 158.446 kW·h,台区损耗率为 3.3 %。

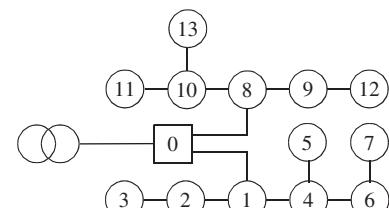


图 2 网络拓扑图

Fig.2 Network topology

表 1 线路参数  
Tab.1 Line parameters

线路名称	型号	L	R	线路名称	型号	L	R
0-1	NLYV50	49	0.30	6-7	NLYV25	70	0.50
0-8	NLYV50	68	0.30	8-9	NLYV50	118	0.30
1-2	NLYV35	108	0.84	8-10	NLYV50	89	0.30
1-4	NLYV50	108	0.30	9-12	NLYV35	98	0.84
2-3	NLYV25	108	0.50	10-11	NLYV25	133	0.50
4-5	NLYV25	48	0.50	10-13	NLYV25	30	0.50
4-6	NLYV35	320	0.84				

注: L 为长度(m), R 为单位电阻( $\Omega/\text{km}$ )。

表 2 负荷参数  
Tab.2 Load parameters

N	W/(kW·h)	W <sub>H</sub> /(kW·h)	N	W/(kW·h)	W <sub>H</sub> /(kW·h)
1	200	2442	8	118	1517
2	687	950	9	459	611
3	263	263	10	489	906
4	636	1492	11	130	130
5	471	471	12	152	152
6	205	385	13	287	287
7	180	180			

注: N 为表箱号, W 为电量, W<sub>H</sub> 为归结后电量。

表 3 固定损耗参数  
Tab.3 Fixed losses

类型	单耗/(kW·h·月 <sup>-1</sup> )	数量
低压电容器	0.5	2
电流互感器	0.5	2
电压互感器	0.5	2
单相表	1.0	15
三相表	2.0	2

表 4 电流数据  
Tab.4 Current data

时段	I <sub>A</sub> /A	I <sub>B</sub> /A	I <sub>C</sub> /A	时段	I <sub>A</sub> /A	I <sub>B</sub> /A	I <sub>C</sub> /A
0	9.98	7.82	4.55	12	26.89	23.62	39.52
1	8.56	7.82	1.52	13	28.23	32.55	29.64
2	7.14	6.26	1.52	14	44.33	51.16	50.37
3	4.28	6.26	1.52	15	33.50	40.99	46.82
4	5.70	7.82	1.52	16	39.05	44.89	44.30
5	5.79	7.57	2.46	17	47.87	43.47	42.06
6	5.79	8.88	9.55	18	49.20	42.40	37.32
7	32.23	29.00	27.77	19	16.54	17.62	20.31
8	27.23	19.12	43.54	20	11.65	22.77	30.78
9	26.81	23.42	43.52	21	18.21	9.28	9.04
10	25.27	26.44	52.78	22	32.09	30.10	24.92
11	28.20	26.44	40.61	23	19.96	20.33	12.13

表 5 线路损耗计算结果

Tab.5 Results of line loss calculation

线路名称	W <sub>L</sub> /(kW·h)	线路名称	W <sub>L</sub> /(kW·h)
0-1	18.915600	6-7	9.005680
0-8	14.357300	8-9	10.269000
1-2	13.679600	8-10	11.104400
1-4	15.925400	9-12	0.108704
2-3	9.602530	10-11	9.181290
4-5	9.026690	10-13	9.199310
4-6	9.070760		

注: W<sub>L</sub> 为线路损耗。

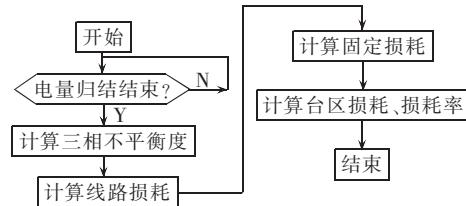


图 3 计算步骤

Fig.3 Calculation steps

## 6 结论

a. 三相不平衡时, 线损与不平衡度按平方关系上升, 最大可高出三相平衡时的 5 倍, 因此搞好三相平衡是企业降损节能的首要措施。

b. 所推导的线损与不平衡度的关系公式可直接用于三相不平衡时的线损计算, 使分析工作简化。

c. 所介绍的线损理论计算系统的计算原理和步骤可在工程实践中加以应用, 尤其是三相不平衡度采集装置的使用, 可清楚表现负荷的运行状况。

## 参考文献:

- [1] 邵俊琴. 三相不平衡线路的线损分析[J]. 电力学报, 2001, 16(2): 91-93.  
GAO Jun-qin. The circuit loss rate analysis of three-phase unbalanced circuit[J]. Journal of Electric Power, 2001, 16(2): 91-93.
- [2] 孟晓丽, 李惠玲, 盛万兴. 省/地/县一体化配电网线损管理系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 87-90.  
MENG Xiao-li, LI Hui-ling, SHENG Wan-xing. Development and implementation of line loss systematic management system for provincial, municipal and country distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 87-90.
- [3] 胡红燕, 温步瀛. 低压台区理论线损计算[J]. 农村电气化, 2006(11): 47-48.  
HU Hong-yan, WEN Bu-ying. Lower-voltage distribution network circuit theoretical loss[J]. Rural Electrification, 2006(11): 47-48.
- [4] 蔡树锦. 三相负荷不平衡对线损的影响[J]. 农村电气化, 2002(4): 23-24.  
CAI Shu-jin. The three-phase unbalanced load on the impact of line losses[J]. Rural Electrification, 2002(4): 23-24.
- [5] 陈复忠. 三相负荷不平衡对低压线损的影响[J]. 农村电工, 2005, 13(5): 36.  
CHEN Fu-zhong. The three-phase unbalanced load on the impact of lower-voltage line losses[J]. Agriculture Electrical Engineering, 2005, 13(5): 36.
- [6] 余卫国, 熊幼京, 周新风, 等. 电力网技术线损分析及降损对策[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 54-57, 63.  
YU Wei-guo, XIONG You-jing, ZHOU Xin-feng, et al. Analysis on technical line losses of power grids and countermeasures to reduce line losses[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 54-57, 63.
- [7] 鲍海, 马千. 电网线损的物理分布机理[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 82-86.  
BAO Hai, MA Qian. Physical distribution mechanism of network loss for power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 82-86.
- [8] 许诺, 黄民翔, 徐瑞德. 可视化配网线损理论计算程序开发[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(5): 39-42.  
XU Nu, HUANG Min-xiang, XU Rui-de. Development of visual theoretical calculation program for line losses of distribution[J].

- Proceedings of the EPSA,2001,13(5):39-42.
- [9] 张伏生,李燕雷,汪鸿.电网线损理论计算与分析系统[J].电力系统及其自动化学报,2002,14(4):18-23.
- ZHANG Fu-sheng,LI Yan-lei,WANG Hong. The theoretical energy loss calculation & analysis system for electric network [J]. Proceedings of the EPSA,2002,14(4):18-23.
- [10] 施流忠,罗毅芳,刘巍,等.电力网电能损耗计算分析的几项功能设计[J].电网技术,1999,23(2):26-28.
- SHI Liu-zhong,LUO Yi-fang,LIU Wei,et al. Principles of calculation and analysis of network line losses[J]. Power System Technology,1999,23(2):26-28.
- [11] 顾秀芳,刘青,关长余,等.基于远方终端测量装置的配电网线损计算[J].继电器,2005,33(11):18-21,25.
- GU Xiu-fang,LIU Qing,GUAN Chang-yu,et al. Line loss cal-

culation of 10 kV distribution network based on remote terminal measurement apparatus[J]. Relay,2005,33(11):18-21,25.

(责任编辑: 汪仪珍)

#### 作者简介:

郭 峰(1982-),男,江苏连云港人,硕士研究生,研究方向为电力市场、配电网综合自动化;

姚莉娜(1979-),女,河南信阳人,助教,研究方向为电工理论与新技术;

刘 恒(1981-),男,河南郑州人,硕士研究生,研究方向为最优潮流、配电网综合自动化;

吴珊珊(1982-),女,福建龙岩人,硕士研究生,研究方向为继电保护、配电网综合自动化。

## Theoretical line loss calculation with three-phase unbalance degree for low-voltage distribution network

GUO Feng<sup>1</sup>, YAO Li-na<sup>2</sup>, LIU Heng<sup>3</sup>, WU Shan-shan<sup>3</sup>

(1. Department of Wire-Design, Fujian Electric Power Design Institute, Fuzhou 350003, China;

2. College of Electric & Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China; 3. Department of Electrical Engineering,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The mean-square-root current method is proposed to calculate the theoretical line loss for low-voltage distribution network. Based on the analysis of three-phase unbalanced line loss, the relationship between line loss and unbalance degree is deduced, which is then applied to theoretical line loss calculation for unbalanced three-phase distribution network. The three-phase unbalance degree acquisition unit is designed, which is connected to the output terminal of transformer to collect and save the real-time three-phase currents for unbalance degree calculation. With a singlechip as its master controller, its system structure is presented. For a real distribution network, the calculation steps are introduced and the calculative results prove its feasibility.

**Key words:** unbalanced three-phase lines; line loss rate; unbalance degree