

配电网三相负荷不对称的线损分析

张五一¹, 张言滨¹, 刘华伟²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 洛阳供电公司, 河南 洛阳 471009)

摘要: 通过分析三相不平衡线路的线损, 用全电流经坐标转换的方法研究了角度不对称时的三相不平衡对线损的影响, 推导出了线损增加率与相不平衡度的关系公式, 并给出了配网中常见几种负荷不对称时的线损分析结果。推导出的线损增加率与相不平衡度的关系公式, 大大简化了分析计算工作, 可以直接用于配电网三相负荷不对称的线损计算中。算例结果表明, 考虑角度不对称时的线损增加率更接近于现实值, 对准确地计算配网中的线损更有指导意义。

关键词: 配电网; 不平衡度; 线损增加率; 角度不对称; 负荷分布方式; 三相不平衡线路

Circuit loss analysis of three-phase unbalanced circuit in distribution network

ZHANG Wu-yi¹, ZHANG Yan-bin¹, LIU Hua-wei²

(1. Northeast Dianli University, Jilin 132012, China; 2. Luoyang Power Supply Company, Luoyang 471009, China)

Abstract: The circuit loss rate is an important economical technical specification of power supply, while at the same time it is a symbol that measures enterprises management level. The condition that circuit loss is affected by three-phase unbalanced circuit with angle asymmetry is studied in the method of full current transformed after the coordinates. Then the relational formula of circuit-loss increment rate and unbalanced degrees of phases is deduced. What is more, the exceptional cases of circuit-loss increment rate which is caused by the three-phase load unbalanced distribution way is offered. The numerical result with a test indicates that when the angle asymmetry is considered, it approaches the realistic value nearer and is a better method to accurately compute the rate of circuit loss in power distribution systems.

Key words: distribution network; unbalanced degree; increment rate of circuit loss; angle asymmetry; load distribution way; three-phase unbalanced circuit

中图分类号: TM711; TM744

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)07-0024-04

0 引言

随着电力系统的发展, 配电网的三相负荷不平衡现象日益突出。当三相负荷分布不对称时, 除了可能导致旋转电机转子发热损坏、继电保护误动作、大负荷相设备过负荷等危害外, 还将严重引起配电网线损的增加。这种增加有时数倍于三相负荷对称分布时的线损。在配电网中, 三相负荷分配不对称是经常的事情, 在实际运行中却往往注意不够, 或者只注意三相负荷的大小不相等, 而忽视了角度的不对称。挖掘这部分降损潜力, 是一件投入小、产出大的事情^[1]。当前对配电网三相负荷分布不对称对线损影响的研究, 有的用严格的对称分量法(Method of Symmetrical Components); 有的只考虑数量的不对称, 没有考虑角度的不对称。在实际配电网的运行过程中, 三相负荷分配的不对称时不

仅存在着数量的不对称, 而且 A、B、C 三相之间的相角差也往往不是 120° 。本文用三相注入电流来研究这一问题, 其过程虽较简单, 但结果比较准确, 使用起来也相当方便。

1 三相负荷不对称的基本类型

根据三相负荷不对称的表现特点, 配网中三相负载不对称的基本类型主要包括^[2]:

1) 三相负载不平衡, 且负载大的相总是大, 负载小的相总是小, 相差的比例在一天的各个时段没有多大变化。这一类的负载三相动力很少, 基本上都是单相用电, 只是负载在三相上分配不均。

2) 在白天负荷时段, 三相负载基本平衡, 晚上负荷高峰时段不平衡程度相当严重。这类负载的特点是三相生产和单相生活用电量都很大。白天主要是生产用电, 三相电压较平衡。因单相生活用电在

三相上分配不均, 形成晚上生活用电高峰时段三相电流相差很大, 造成三相电压不平衡。

3) 有的三相负载不平衡随季节变化, 这是由于各季节三相生产用电和单相生活用电的比例在变化, 而单相负载在三相上分配不均造成的。

4) 各相负载电流大小随时间变化, 在这一时间里这一相电流大, 而在另一时间里另外一相电流又相对较大。这反映了单相负载波动大, 而该波动在三相上是不同步的。

2 三相负荷不对称对线路损耗的影响

配网三相负荷不对称运行时, 由于各相的负荷电流不相等, 就会在相间产生不平衡电流。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^[3]。

我们已经知道, 对于图 1 所示的三相四线制接线方式, 在三相平衡的情况下, 若设每相负荷电流为 I , 每相电阻为 R 时, 线损为:

$$\Delta P_b = 3I^2 R \quad (1)$$

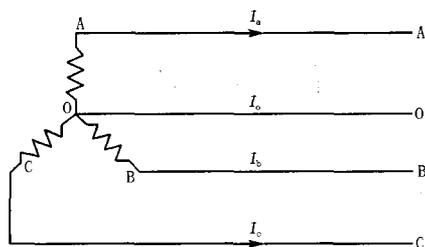


图 1 三相四线制接线方式

Fig.1 Connecting diagram of three-phase four-wire system

但是在电力系统运行过程中, 一般的情况是不仅三相负荷的大小不相等, 而且角度也不对称。为说明三相不平衡程度对线路损耗的影响, 我们引入相不平衡度 β 的概念^[4]:

$$\beta_\phi = \frac{I_\phi - I_{cp}}{I_{cp}} \times 100\% \quad \phi \in \{A, B, C\} \quad (2)$$

其中: I_{cp} 为三相负荷平均相电流; $I_{cp} = (I_A + I_B + I_C)/3$; I_ϕ 为相电流值, 有 $I_\phi = (1 + \beta_\phi) I_{cp}$ 。

由于 I_ϕ 的取值范围为 $0 \sim 3I_{cp}$, 因此 β_ϕ 的取值范围为 $-1 \sim 2$, 且存在如下关系:

$$\beta_A + \beta_B + \beta_C = 0 \quad (3)$$

由式 (2) 可设 $I_A = (1 + \beta_A) I_{cp}$;

$$I_B = (1 + \beta_B) I_{cp} \angle \varphi_B; \quad I_C = (1 + \beta_C) I_{cp} \angle \varphi_C$$

则此时中线上的复电流可表示为:

$$\begin{aligned} I_N &= I_A + I_B + I_C = (1 + \beta_A) I_{cp} + (1 + \beta_B) I_{cp} \angle \varphi_B + \\ & (1 + \beta_C) I_{cp} \angle \varphi_C = I_{cp} \{ [(1 + \beta_A) + (1 + \beta_B) \cdot \\ & \cos \varphi_B + (1 + \beta_C) \cos \varphi_C] + j [(1 + \beta_B) \sin \varphi_B + \\ & (1 + \beta_C) \sin \varphi_C] \} \end{aligned} \quad (4)$$

为方便通常记作:

$$I_N = I_{cp} \sqrt{M^2 + N^2}$$

其中:

$$M = (1 + \beta_A) + (1 + \beta_B) \cos \varphi_B + (1 + \beta_C) \cos \varphi_C$$

称为负荷电流的有功权重;

$$N = (1 + \beta_B) \sin \varphi_B + (1 + \beta_C) \sin \varphi_C$$

称为负荷电流的无功权重。

$$\begin{aligned} M^2 + N^2 &= [(1 + \beta_A) + (1 + \beta_B) \cos \varphi_B + (1 + \beta_C) \cdot \\ & \cos \varphi_C]^2 + [(1 + \beta_B) \sin \varphi_B + (1 + \beta_C) \cdot \\ & \sin \varphi_C]^2 = (1 + \beta_A)^2 + (1 + \beta_B)^2 + \\ & (1 + \beta_C)^2 + 2[(1 + \beta_A) [(1 + \beta_B) \cdot \\ & \cos \varphi_B + (1 + \beta_C) \cos \varphi_C] + \\ & (1 + \beta_B) (1 + \beta_C) \cos (\varphi_B + \varphi_C)] \end{aligned}$$

因此, 三相不平衡时, 线路损耗变为:

$$\begin{aligned} \Delta P_{unb} &= (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) R + I_N^2 R_N = [(1 + \beta_A)^2 + \\ & (1 + \beta_B)^2 + (1 + \beta_C)^2] I_{cp}^2 R + \\ & [M^2 + N^2] I_{cp}^2 R_N \end{aligned} \quad (5)$$

式中: R_N 为中线电阻, 由于中性线的截面一般是输电线路截面的一半, 故可取 $R_N = 2R$ 。

此时, 线路损耗可以写成:

$$\begin{aligned} \Delta P_{unb} &= I^2 R [(1 + \beta_A)^2 + (1 + \beta_B)^2 + (1 + \beta_C)^2 + \\ & 2(M^2 + N^2)] = \{ 3 [(1 + \beta_A)^2 + (1 + \beta_B)^2 + \\ & (1 + \beta_C)^2] + 4(1 + \beta_A) [(1 + \beta_B) \cos \varphi_B + \\ & (1 + \beta_C) \cos \varphi_C] + 4(1 + \beta_B) (1 + \beta_C) \cdot \\ & \cos(\varphi_B - \varphi_C) \} I_{cp}^2 R \end{aligned} \quad (6)$$

由式 (1) 和式 (6) 可知。当配电网三相负荷分布不对称时, 三相线损的增加率为:

$$\begin{aligned} \lambda &= (1 + \beta_A)^2 + (1 + \beta_B)^2 + (1 + \beta_C)^2 + \frac{4}{3} \{ (1 + \beta_A) \cdot \\ & [(1 + \beta_B) \cos \varphi_B + (1 + \beta_C) \cos \varphi_C] + (1 + \beta_B) \cdot \\ & (1 + \beta_C) \cos(\varphi_B - \varphi_C) \} - 1 \end{aligned} \quad (7)$$

由式 (3) 可知: $\beta_C = -\beta_A - \beta_B$ 代入式 (7)

整理可得:

$$\lambda = \frac{\Delta P_b - \Delta P_{unb}}{\Delta P_{unb}} = 2(1 + \beta_A^2 + \beta_B^2 + \beta_A \beta_B) +$$

$$\frac{4}{3}[(1+\beta_A)(1+\beta_B)\cos\varphi_B + (1+\beta_A)(1-\beta_A-\beta_B)\cos\varphi_C + (1+\beta_B)(1-\beta_A-\beta_B)\cos(\varphi_B-\varphi_C)] \quad (8)$$

3 配网中几种负荷不对称特例的线损分析

以下将分别讨论几种特殊配电网三相负荷分布不对称的情况对线损的影响。在这些特殊情况下, 表达式(8)将改变其中的 β_A 、 β_B 、 φ_B 、 φ_C 取值。

(1) 三相负荷分布大小不等, 角度对称
(设 $\varphi_A=0^\circ$, $\varphi_B=-120^\circ$, $\varphi_C=120^\circ$)

$$\lambda = 2(1+\beta_A^2+\beta_B^2+\beta_A\beta_B) - \frac{2}{3}[(1+\beta_A)(2-\beta_A) + (1+\beta_B)(1-\beta_A-\beta_B)]$$

(2) 三相负荷分布大小相等, 角度不等
(即: $\beta_A+\beta_B+\beta_C=0$)

$$\lambda = 2 + \frac{4}{3}[\cos\varphi_B + \cos\varphi_C + \cos(\varphi_B-\varphi_C)]$$

(3) 仅两相有负荷, 大小相等, 相角差不为 120°

(设 $\beta_A=-1$; $\beta_B=\beta_C=0.5$; $\varphi_B-\varphi_C \neq 120^\circ$)

$$\lambda = 3.5 + \frac{4}{3}[2.25 \times \cos(\varphi_B-\varphi_C)] = 3.5 + 3 \cos(\varphi_B-\varphi_C)$$

(4) 仅两相有负荷, 大小不等, 相角差不为 120° 。(设 $\beta_A=-1$; $\varphi_B-\varphi_C \neq 120^\circ$)

$$\lambda = 2(2-\beta_B^2-\beta_B) + \frac{4}{3}[(1+\beta_B)(2-\beta_B)\cos(\varphi_B-\varphi_C)]$$

(5) 仅两相有负荷, 大小不等, 相角差为 120°
(设 $\beta_A=-1$; $\varphi_B-\varphi_C=120^\circ$)

$$\lambda = 2(2-\beta_B^2-\beta_B) - \frac{2}{3}(1+\beta_B)(2-\beta_B)$$

(6) 仅两相有负荷, 大小相等且相角差为 120°
(设 $\beta_A=-1$; $\varphi_B-\varphi_C=120^\circ$)

$$\lambda = 3.5 + \frac{4}{3} \times (2.25 \times \cos 120^\circ) = 3$$

(7) 仅一相有负荷 (设 $\beta_A=-1$; $\beta_B=-1$)

$$\lambda = 8$$

4 算例

洛阳市某供电分区一天 12 个时刻内采集到的 10/0.4 kV 变压器低压侧整点数据如表 1 所示。

表 1 变压器低压侧的电流值

抄收时间	A 线电流 /A	B 线电流 /A	C 线电流 /A	0 线电流 /A
00: 00: 00	77.6	52.0	43.6	56.8
01: 00: 00	67.6	46.8	43.2	43.8
02: 00: 00	58.8	40.8	34.0	38.6
03: 00: 00	60.8	42.0	32.8	43.0
04: 00: 00	66.8	40.4	37.2	44.8
05: 00: 00	70.4	51.6	39.2	42.2
06: 00: 00	74.8	63.2	60.8	33.6
07: 00: 00	100.0	68.4	60.0	74.0
08: 00: 00	113.6	74.4	75.6	83.6
09: 00: 00	97.2	57.2	55.6	83.6
10: 00: 00	89.6	71.6	62.0	65.4
11: 00: 00	102.0	61.6	63.2	78.4

应用本文推导的三相不平衡度与线损增加率的关系公式, 分别计算考虑角度不对称和不考虑角度不对称两种典型情况下的线损增加率, 其计算结果如表 2 所示。

表 2 变压器低压侧电流与线损增加率的关系

0 线实际 电流/A	0 线计算 电流/A	考虑角度不对称 时线损增加率	不考虑角度不对 称时线损增加率
56.8	30.675 07	0.708 02	0.250 937 388
43.8	22.814 03	0.505 343	0.167 641 526
38.6	22.195 5	0.556 057	0.220 803 901
43	24.719 22	0.669 812	0.265 852 194
44.8	28.136 81	0.653 463	0.303 742 298
42.2	27.208 82	0.468 173	0.227 918 404
33.6	12.967 65	0.179 904	0.034 039 246
74	36.531 63	0.680 994	0.204 661 377
83.6	38.613 99	0.646 411	0.171 667 653
83.6	40.823 52	1.026 46	0.302 323 81
65.4	24.268 5	0.538 776	0.094 577 408
78.4	39.624 24	0.778 011	0.244 188 759

5 结论

1) 三相不平衡时, 线损增加率与不平衡度按平方关系上升, 当中线电阻为 2 倍的输电线电阻时, 最大值可高达三相平衡时的 8 倍, 因此搞好三相平衡应作为企业降损节能的首要措施。

2) 即使三相负荷大小相等, 当角度不对称时, 同样可以引起线损的增加, 因此在实际计算中, 不应仅仅局限于考虑三相负荷的大小关系。

3) 本文推导的线损增加率与不平衡度的关系

公式可直接用于三相不平衡时的线损计算, 从而使分析计算工作大为简化。

附表

附表 1 总负荷 (3I) 不变, 三相负荷分布方式不平衡时引起的线损增加率

序号	三相负荷分布方式	引起的线损增加率
1	三相对称分布	0
2	三相负荷大小角度都不对称	$2(1+\beta_A^2+\beta_B^2+\beta_A\beta_B)+4[(1+\beta_A)\cdot\cos\varphi_B+(1+\beta_B)(1-\beta_A-\beta_B)\cos\varphi_C+(1+\beta_B)(1-\beta_A-\beta_B)\cos(\varphi_B-\varphi_C)]/3$
3	三相负荷大小不等, 角度对称	$2(1+\beta_A^2+\beta_B^2+\beta_A\beta_B)-2[(1+\beta_A)\cdot(2-\beta_A)+(1+\beta_B)(1-\beta_A-\beta_B)]/3$
4	三相负荷大小相等, 角度不等	$2+4[\cos\beta_B+\cos\beta_C+\cos(\varphi_B-\varphi_C)]/3$
5	仅两相有负荷, 大小相等, 相角差不为 120°	$3.5+3\cos(\varphi_B-\varphi_C)$
6	仅两相有负荷, 大小不等, 相角差不为 120°	$2(2-\beta_B^2-\beta_B)+4[(1+\beta_B)(2-\beta_B)\cdot\cos(\varphi_B-\varphi_C)]/3$
7	仅两相有负荷, 大小不等, 相角差为 120°	$2(2-\beta_B^2-\beta_B)-2(1+\beta_B)(2-\beta_B)/3$
8	仅两相有负荷, 大小相等, 相角差为 120°	3
9	单相运行	8

参考文献

- [1] 卜永红. 配电网三相负荷不对称对技术线损的影响[J]. 大众电气, 2004, (12): 30-31.

(上接第 10 页 continued from page 10)

- LI Yin-hong, et al. Study on Line Protection Integrative Coordination System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 66-69.
- [4] Damborg M J, et al. Application of Relational Data Base to Computer-aided-engineering of Transmission Protection Systems[J]. IEEE Trans on PWRs, 1996, 1(2): 187-193.
- [5] 潘爱民. COM 的原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- PAN Ai-min. Principle and Application of COM[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999.
- [6] 高军, 李晓明. 基于三层结构的电力信息系统智能报表的研究[J]. 电力科学与工程, 2003, (3): 23-26.
- GAO Jun, LI Xiao-ming. Research of Intelligence Report Based on Three-layer Structure in Power Information System[J]. Electric Power Science and Engineering, 2003, (3): 23-26.
- [7] 孙庆恭, 杨新梅, 等. 一种基于 B/S 三层结构维护、查询及实现折线图方法[J]. 电力情报, 2001, (4): 31-34.

BO Yong-hong. Influence on Technical Loss by Three-phase Load Unbalanced in Distribution Networks[J]. Popular Utilization of Electricity, 2004, (12): 30-31

- [2] 王树田. 三相不平衡线路的线损分析[J]. 农村电气化, 1994, (2): 29-30.
- WANG Shu-tian. The Circuit Loss Rate Analysis of Three-Phase Unbalanced Circuit [J]. Rural Electrification, 1994, (2): 29-30.
- [3] 郜俊琴. 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.
- [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. Influence on Circuit Loss by Three-phase load Unbalanced[J]. Rural Electrification, 2002, (4): 23-24.

收稿日期: 2006-10-12; 修回日期: 2007-01-22

作者简介:

张五一(1977-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统运行与分析;

张言滨(1979-), 男, 硕士, 研究方向为配电网简化分析与优化;

刘华伟(1977-), 男, 高工, 研究方向为变电运行。
E-mail: lhw13837916317@163.com

SUN Qing-gong, YANG Xin-mei, et al. Maintenance, Query and Plotting Methods Based on 3 Tiered B/S System[J]. Information on Electric Power, 2001, (4): 31-34.

- [8] 南瑞继保. RCS 系列线路保护装置技术说明书[Z]. Nari. RCS Series Transmission Line Protection Manual[Z].
- [9] Zhu J, Jossman P. Application of Design Patterns for Object-oriented Modeling of Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14 (2): 532-537.

收稿日期: 2006-10-10; 修回日期: 2006-12-11

作者简介:

王星华(1972-), 男, 讲师, 从事电力系统分析、信息化电力系统、电能质量等领域的研究和开发;
E-mail: riskmouse@163.com

石东源(1974-), 男, 副教授, 从事电力系统分析、二次系统自动化、电力系统软件技术等领域的研究;

段献忠(1966-), 男, 教授, 从事无功电压、FACTS、电力系统网络化控制、电力系统软件技术等领域的研究。