

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191561

三相不平衡及谐波对三相四线低压配电网线损的影响

谢荣斌¹, 杜帆¹, 程湘², 周群², 徐方维²

(1. 贵州电网贵阳息烽供电局, 贵州 贵阳 551100; 2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对三相四线制低压配电网中的线损问题, 提出了在复合电能质量作用下的线损计算方法以及与单一电能质量作用下的线损比较方法。首先对三相不平衡引起的线损进行推导; 其次依据叠加原理推导谐波条件下的线损; 然后综合考虑和推导这两种电能质量共同作用下的线损, 并根据对称分量法对这两种电能质量在单独与共同作用下的线损进行比较。结果表明三相不平衡加剧谐波损耗, 即谐波及三相不平衡共同存在时的线损大于各自单独存在时造成的线损之和。最后利用 Matlab/Simulink 仿真工具和 chroma 6590 可编程交流电源对每一部分均进行实验, 验证了理论推导的正确性。

关键词: 谐波; 三相不平衡; 线损; Matlab/Simulink; chroma 6590 可编程交流电源

Influence of three-phase imbalance and harmonic on line loss of three-phase four-wire low-voltage distribution network

XIE Rongbin¹, DU Fan¹, CHENG Xiang², ZHOU Qun², XU Fangwei²

(1. Guiyang Xifeng Power Supply Bureau of Guizhou Power Grid, Guiyang 551100, China;

2. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Aiming at problem of line loss in a three-phase four-wire low voltage distribution network, this paper presents a method for calculating line loss under the action of composite power quality and compares it with that under the action of single power quality. First, the line loss caused by three-phase imbalance is deduced. Secondly, the line loss under harmonic condition is derived according to the superposition principle. Then the line losses under the combined action of the two power qualities are comprehensively considered and derived, and the line losses under the combined action of the two power qualities are compared by the symmetric component method. The results show that the three-phase imbalance aggravates the harmonic loss, that is, the line loss when the harmonic and the three phase unbalance exist together is greater than the sum of the line loss when they exist separately. Finally, the Matlab/Simulink simulation tool and chroma 6590 programmable AC source experiment are used to test each part and verify the correctness of the theoretical derivation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877141) and Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company (No. 0002200000042389).

Key words: harmonic; three-phase imbalance; line loss; Matlab/Simulink; chroma 6590 programmable AC source

0 引言

随着电力系统的用电规模急剧扩大, 电能质量问题日趋严峻, 所引起的诸多负面影响也越来越严重。而对配电网最直接的负面影响是增加线路的电

能损耗, 我国低压配电网的电能损耗占供配电网总损耗的 50%~60%^[1], 直接影响着电网企业的经营效益^[2]。

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^[3]。配电网不同于输电网, 其自动化水平较为低下, 同时具有三相不平衡、网络呈辐射状的特点^[4], 故目前的配电网线损计算方法难以准确计算其理论线损。虽然近年来配电网随着建设投入的不断加大, 取得了长足发展, 但相对于国际先进水平仍有差距^[5-6]。而且人民群众生产生活对

基金项目: 国家自然科学基金项目(51877141)“新一代电力系统中谐波发射水平评估理论与方法研究”; 南方电网公司科技项目(0002200000042389)“配电网电能质量引起线损量化评估及修正计算方案研究”

电力的依赖度越来越高, 对配电网供电质量提出了更高要求^[7], 故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, 这对供电企业的合理投资和经济效益的提高具有重要意义^[8]。

在诸多电能质量问题中, 谐波与三相不平衡对电网线路损耗造成的影响较大^[9]。目前国内外的相关研究大多集中在谐波与三相不平衡对低压配电网损耗的影响以及治理措施方面, 且大多为针对单一电能质量的研究。文献[10-12]引入了一种考虑三相不平衡的低压电网理论线损计算方法; 文献[13]推导了在相角和幅值不平衡下的理论线损计算方法; 文献[14-15]分别研究了谐波、三相不平衡对低压配电网损耗的影响; 文献[16]通过实验证明了谐波对变压器损耗和寿命的影响; 文献[17]分析了谐波对配电电缆的损耗影响; 文献[18]分析了电动汽车充电站的谐波对电网产生的影响。文献[19-21]分别研究了三相不平衡、谐波的治理方案。其中也有部分关于复合电能质量问题的研究。文献[1]通过仿真得出结论: 谐波及三相不平衡共同存在时的线损小于各自单独存在时造成的线损之和, 但该结论并未给出理论和实际实验证明。文献[22]分析了三相不平衡与谐波单独与共同作用下对变压器损耗的影响。根据网架结构的不同, 配电网可分为三相三线制和三相四线制两种, 三相三线制主要针对 10 kV 电压等级的中压配电网, 三相四线制主要针对 380 V/220 V 电压等级的低压配电网^[5]。文献[9]通过理论和仿真实验得出在三相三线制输电线路中, 三相不平衡及谐波共同存在时的线损大于各自单独存在时造成的线损之和。但是在三相四线制系统中可能包含零序电压和零序电流^[23], 零序分量造成的线损同样不可忽略, 故在三相四线制线路中的线损研究更具有实用意义。

本文在基于上述研究基础上进一步推导在三相四线制低压配电网中, 三相不平衡与谐波同时作用下对线损的影响。首先分别推导三相不平衡与谐波单独作用下的理论线损的计算公式, 然后推导出三相不平衡与谐波同时作用下的理论线损的计算公式, 最后根据对称分量法对这两种不同情况下的理论线损进行比较。并针对每一部分的理论推导, 分别通过 Matlab/Simulink 仿真工具和 chroma 6590 可编程交流电源实际实验来进行验证。

1 三相不平衡与谐波单独存在时的线损

1.1 三相不平衡下附加损耗的计算

为了使三相不平衡对电网和用户的影响在允许范围内, 国家于 2008 年颁布了 GB/T 15543—2008

《电能质量三相电压不平衡》标准^[24]。该标准使用电压序分量法来保证用户正常用电。但对于线损推导来说, 使用电流序分量法显然更为直接和有效。

选择一条典型线路, 假设相线与中性线电阻均为 R , 当处于三相平衡状态时, 线路电流为 I , 则相应的平衡状态下的线损 ΔP 为

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

当线路处于三相不平衡状态时, 三相电压、电流相量不对称。根据对称分量法, 任意一组不对称的三相电流相量 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 可以分解为三组三相对称的电流相量: 正序、负序和零序 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 、 \dot{I}_0 。

假设正序、负序、零序电流 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 、 \dot{I}_0 为

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = I_1 \angle 0^\circ \\ \dot{I}_2 = I_2 \angle \alpha_2^\circ \\ \dot{I}_0 = I_0 \angle \alpha_0^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_1 、 I_2 、 I_0 分别为正序、负序和零序电流的有效值; α_1 、 α_2 、 α_0 为正序、负序和零序电流的相位角。则对其进行变换后可得:

$$I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 = 3(I_1^2 + I_2^2 + I_0^2) \quad (3)$$

式中, I_A 、 I_B 、 I_C 分别为 A 相、B 相、C 相电流相量的有效值。

当线路处于三相不平衡状态时, 中性线将有零序电流流过, 此时三线四线制的有功线损 ΔP 为

$$\begin{aligned} \Delta P &= (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)R + I_N^2 R = \\ &= 3(I_1^2 + I_2^2 + I_0^2)R + (3I_0)^2 R \end{aligned} \quad (4)$$

式中, I_N 表示中性线电流的有效值, $I_N = 3I_0$ 。

IEEE Std 1459 -2010 标准在计算三相四线制线路的功率时, 首先计算出等效电流 I_e :

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{3}(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2)} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 4I_0^2} \quad (5)$$

则其相应的线路损耗 ΔP 为

$$\Delta P = 3I_e^2 R = 3(I_1^2 + I_2^2 + 4I_0^2)R \quad (6)$$

其计算结果与式(4)一致, 证明推导正确。

分别定义负序电流不平衡度与零序电流不平衡度。负序电流不平衡度 β_2 即是负序分量有效值与正序分量有效值之比, 同理, 零序电流不平衡度 β_0 为零序分量与正序分量有效值之比, 其表达式为

$$\begin{cases} \beta_2 = \frac{I_2}{I_1} \\ \beta_0 = \frac{I_0}{I_1} \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6), 则线损 ΔP 为

$$\Delta P = 3I_1^2(1 + \beta_2^2 + 4\beta_0^2)R \quad (8)$$

为了量化三相不平衡、谐波与线损的关系，本文采用线损增比 σ 来表示，其定义为

$$\sigma = \frac{\Delta P - P}{P} \times 100\% \quad (9)$$

式中： ΔP 表示三相不平衡或谐波单独作用时的线损或三相不平衡与谐波同时作用时的线损； P 表示既无三相不平衡，也无谐波作用时的线损。

线损增比与各序电流不平衡度关系如图 1。

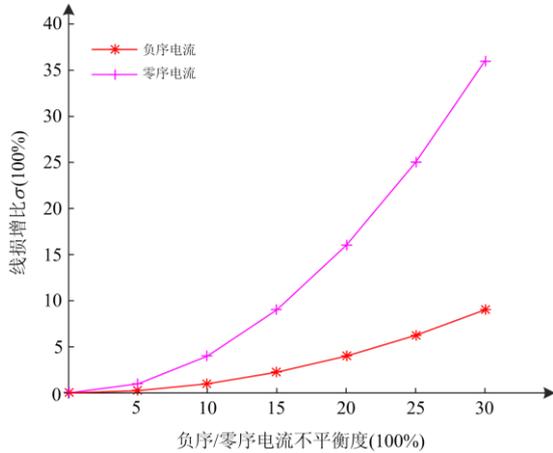


图 1 负序、零序电流不平衡度与损耗的关系折线图

Fig. 1 Relation between negative sequence current and zero sequence current unbalance degree to loss line graph

由图 1 可得，线损增比分别与负序电流和零序电流不平衡度的平方成正比，且零序电流不平衡度对线损的影响大于负序电流的影响。

1.2 谐波下的附加损耗计算

近年来，随着现代电子技术的迅速发展，以及智能电网、分布式电源的并网运行，大量非线性、冲击性、不平衡性负荷以及某些调制装置，如统一潮流控制器(UPFC)^[25]等接入电网，导致电力系统波形失真，给电网带来了大量谐波污染^[26]，进而造成严重危害，如线损增加、变压器过热与继电保护装置失灵等^[27]。国标中对谐波的定义为：对周期性交流流量进行傅里叶级数分解，得到频率为基波频率大于 1 的整数倍的分量即为谐波^[28]。

为了描述单次谐波畸变的严重程度，这里使用第 h 次谐波电流含有率 HRI_h 来描述，即

$$HRI_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (10)$$

式中： h 为谐波次数； I_1 为基波电流的有效值； I_h 为第 h 次谐波分量电流有效值。

线路在高次谐波电流的影响下存在趋肤效应，

进而使阻抗值改变。鉴于此，国内外学者针对配电线路谐波阻抗的计算提出了很多模型^[29-30]，本文采用应用比较广泛的确定谐波阻抗的方法^[1]。即线路的各次谐波阻抗为

$$R_h = \sqrt{h}R \quad (11)$$

式中： R 为导体的基波电阻值； R_h 为第 h 次谐波的电阻值。

设 k 为正整数，分两种情况计算谐波线损。

1) $h = 3k + 1$ 次谐波属于正序谐波； $h = 3k + 2$ 次谐波属于负序谐波。这两种谐波在平衡状态的线路中产生的损耗 ΔP_h 的计算公式为

$$\Delta P_h = 3I_1^2 \sum_{k=0}^{\infty} HRI_h^2 \sqrt{h}R = 3 \sum_{k=0}^{\infty} I_h^2 \sqrt{h}R \quad (12)$$

2) $h = 3k$ 次谐波属于零序谐波，故在相线和中性线上都会产生损耗。其计算公式为

$$\begin{aligned} \Delta P_h &= 3I_1^2 \sum_{k=0}^{\infty} HRI_h^2 \sqrt{h}R + \sum_{k=0}^{\infty} (3I_h)^2 \sqrt{h}R = \\ &12I_1^2 \sum_{k=0}^{\infty} HRI_h^2 \sqrt{h}R = 12 \sum_{k=0}^{\infty} I_h^2 \sqrt{h}R \end{aligned} \quad (13)$$

线损增比与谐波含量和次数的关系如图 2。

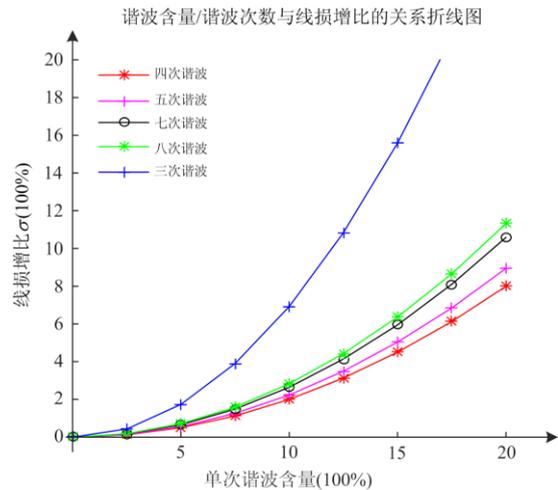


图 2 谐波含量和次数与损耗的关系折线图

Fig. 2 Relation of harmonic content and frequency to loss line graph

由图 2 可得，线损增比与谐波含量的平方成正比。随着谐波次数的增大，线损随之增大；对于零序谐波，由于中性线的额外损耗，其线损可能会大于比之高次的正序或负序谐波线损。

2 复合电能质量扰动下线损的计算

当三相不平衡及谐波同时作用于线路时，三相第 h 次谐波电流有效值分别为 I_{Ah} 、 I_{Bh} 、 I_{Ch} ，中性

线电流有效值为 I_{Nh} 。依据叠加原理, 总线路损耗 ΔP_{un+h} 为基波线损加上各次谐波线损, 其计算式为

$$\Delta P_{un+h} = (I_{A1}^2 + I_{B1}^2 + I_{C1}^2)R + I_{N1}^2 R + \sum_{h=2}^{\infty} [(I_{Ah}^2 + I_{Bh}^2 + I_{Ch}^2)\sqrt{h}R + I_{Nh}^2 \sqrt{h}R] \quad (14)$$

式中: I_{A1} 、 I_{B1} 、 I_{C1} 分别为基波 A、B、C 三相电流的有效值; I_{N1} 为基波的中性线电流有效值。

用对应的各序分量可以表示为

$$\Delta P_{un+h} = 3(I_1^2 + I_2^2 + I_0^2)R + (3I_0)^2 R + 3 \sum_{h=2}^{\infty} [(I_{1h}^2 + I_{2h}^2 + I_{0h}^2)\sqrt{h}R + (3I_{0h})^2 \sqrt{h}R] \quad (15)$$

式中, I_{1h} 、 I_{2h} 、 I_{0h} 分别为分解后的对应的第 h 次谐波正序、负序、零序电流的有效值。

3 线损比较

对于三相平衡时的谐波电流与三相不平衡时的谐波电流有如下关系。

1) 当 $h = 3k + 1$, 此时平衡时的电流等于不平衡时的正序电流, $I_h = I_{1h}$ 。

2) 当 $h = 3k + 2$ 时, 此时平衡时的电流等于不平衡时的负序电流, $I_h = I_{2h}$ 。

由上面可以得出:

$$3(I_{1h}^2 + I_{2h}^2 + I_{0h}^2)\sqrt{h}R + (3I_{0h})^2 \sqrt{h}R > 3I_h^2 \sqrt{h}R \quad (16)$$

3) 当 $h = 3k$ 时, 此时平衡时的中性线电流近似等于三相不平衡时的电流, $I_{Nh} \approx I_{N0h}$, 故在中性线上的电流和损耗 ΔP_N 不变, 如下:

$$\Delta P_N = (3I_{N0h})^2 \sqrt{h}R = (3I_{Nh})^2 \sqrt{h}R \quad (17)$$

即此时中性线上的线损在处于平衡状态时与处于三相不平衡状态时的线损近似相同。但由于每相上的电流不一样, 其相线损耗情况有所不同。根据均值不等式, 对实数 a 、 b 、 c , 有

$$a^2 + b^2 + c^2 \geq \frac{(a+b+c)^2}{3} \quad (18)$$

(当且仅当 $a=b=c$, “=” 号成立)

由式(17)和式(18)可推导出

$$3(I_{1h}^2 + I_{2h}^2 + I_{N0h}^2)\sqrt{h}R + (3I_{N0h})^2 \sqrt{h}R > 3 \sum_{k=0}^{\infty} I_{Nk}^2 \sqrt{h}R + \sum_{k=0}^{\infty} (3I_{Nk})^2 \sqrt{h}R \quad (19)$$

故当三相不平衡与谐波同时作用于三相四线制线路时, 会相互放大影响, 加剧线路损耗, 所引

起的线损大于三相不平衡或谐波单独存在时所引起的线损之和。特别是对于非 3 倍数次谐波, 由于不平衡时的额外的中性线线损, 其影响效果更加显著。

4 仿真实验

三相四线制线路采用钢芯铝绞线 LGJ-120, 水平排列, 各相间距 1 m, 平衡时每相负荷 20 kVA, 功率因数为 0.9。经过计算, 得到如下线路数据:

$$\left\{ \begin{array}{l} r = \frac{\rho}{S} = \frac{31.55}{120} = 0.263 \Omega/\text{km} \\ D_{\text{eq}} = \sqrt[3]{1000 \times 1000 \times 2000} = 1260 \text{ mm} \\ D_s = 0.779r = 0.779 \times 15.2/2 = 5.92 \text{ mm} \\ l = \frac{u_0}{4\pi} \text{Ln} \frac{D_{\text{eq}}}{D_s} = \frac{4\pi \times 10^{-4}}{2\pi} \text{Ln} \frac{1260}{5.92} = 10.721 \times 10^{-4} \text{ H/km} \end{array} \right. \quad (20)$$

在 Matlab/Simulink 仿真软件中建立如图 3 所示的简单模型, 验证上述理论推导的正确性。

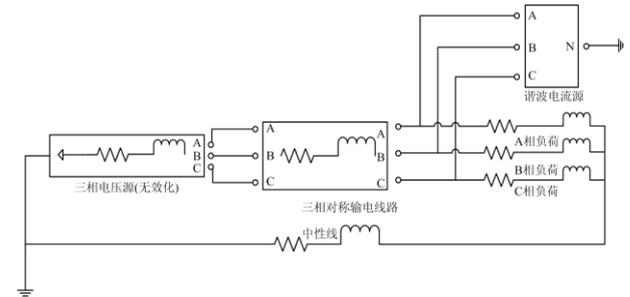


图 3 三相不平衡及谐波仿真模型图

Fig. 3 Diagram of three-phase unbalance and harmonic simulation model

根据实际配电网中可能出现的各相负荷轻重情况, 这里列举了五种较具有代表性的三相负荷不平衡情况, 情况 1 表示一相负荷平均, 另外两相负荷一重一轻的情况; 情况 2 表示两相负荷重, 一相负荷轻的情况; 情况 3 表示两相负荷轻, 一相负荷重的情况; 情况 4 表示双相供电的情况; 情况 5 表示极端的单相供电情况, 如表 1 所示。

表 1 五种不同的三相不平衡情况

Table 1 Five different kinds of three-phase unbalanced cases

不平衡情况	A 相负荷/kVA	B 相负荷/kVA	C 相负荷/kVA
情况 1	30	20	10
情况 2	25	25	10
情况 3	30	15	15
情况 4	30	30	0
情况 5	60	0	0

4.1 三相不平衡线损的仿真

三相电压源按照理想情况设置,即每相电压有效值 220 V,相位相差 120°,谐波源(即等效电流源)置零,中性线阻抗等于相线阻抗。分别调整负荷情况至上述的平衡状态与五种三相不平衡情况,接下来测量数据与计算结果如表 2 所示。

表 2 不同情况下的线损

Table 2 Line loss in different conditions

不平衡情况	A 相 电流/A	B 相 电流/A	C 相 电流/A	N 线 电流/A	总损耗/ W
三相平衡	78.06	78.06	78.06	0	4 807.66
情况 1	101.08	79.40	44.65	41.78	5 328.57
情况 2	89.84	92.49	44.91	36.73	5 257.80
情况 3	102.24	63.41	62.13	34.22	5 129.81
情况 4	98.46	106.21	0	77.78	7 107.49
情况 5	135.48	0	0	135.48	9 564.64

由表 2 数据可得,三相平衡时的线损最小,不平衡时的线损增大,不平衡的程度越大,其线损越大。当负荷全部集中在一相时,其线损是最大的。

4.2 谐波线损的仿真

先设定系统中三相负荷平衡,同时使三相电压源短路无效化。负荷侧加入幅值和频率可调的等效电流源,以此模拟谐波源。

1) 首先考虑谐波含量对线损的影响。每相加入三次谐波(零序谐波,即相相差为 0°),幅值为 10 A,线路电阻变为 $0.263 \times \sqrt{3} = 0.4555 \Omega$,改变幅值(20 A、30 A、40 A)后测量,测量数据如表 3 所示。

表 3 三次谐波含量与谐波线损

Table 3 Third harmonic content and harmonic line loss

谐波 含量	A 相 电流/A	B 相 电流/A	C 相 电流/A	N 线 电流/A	总损耗/ W
10 A	3.30	3.30	3.30	9.89	59.43
20 A	6.59	6.59	6.59	19.78	237.56
30 A	9.89	9.89	9.89	29.66	534.11
40 A	13.18	13.18	13.18	39.55	949.87

由表 3 数据可以得出,线损随着谐波含量的增大而增大,且按照抛物线的增长趋势变化。同理,对于正、负序谐波的变化情况也是如此。

2) 其次是研究谐波次数对线损的影响。随着谐波次数的增大,趋肤响应增强,线路电阻也增大。3 次谐波: 0.4555 Ω; 4 次谐波: 0.526 Ω; 5 次谐波: 0.588 Ω; 6 次谐波 0.644 Ω。测量结果如表 4。

由表 4 数据可得,当谐波为正序、负序时,线损随着谐波次数的增大而增大;当谐波为零序时,由于存在额外中性线线损的缘故,其线损可能大于比之高次的谐波造成的线损。

表 4 三相平衡情况下的谐波次数与谐波线损关系

Table 4 Relation between harmonic frequency and harmonic line loss in three-phase balance

谐波 次数	A 相 电流/A	B 相 电流/A	C 相 电流/A	N 线 电流/A	总损耗/ W
3	3.30	3.30	3.30	9.89	59.43
4	5.43	5.43	5.43	0	46.53
5	5.39	5.39	5.39	0	51.25
6	3.12	3.12	3.12	9.36	75.23

4.3 三相不平衡与谐波共同作用时的线损的仿真

在进行这部分仿真验证时,为了保证线路中存在复合电能质量问题(即三相不平衡与谐波同时存在于线路),可以通过调整三相负荷分配比例和等效电流源的幅值和频率来达到调节的目的。

在这里,只需在每一相中加入恒定的三次谐波(零序谐波,幅值 40 A)和调整三相负荷比例来进行验证即可,由于趋肤效应,对应的线路电阻也变为相应的 0.4555 Ω,测量和线损计算结果如表 5。

表 5 不同不平衡情况下的三次谐波线损

Table 5 Third harmonic line loss under different unbalanced conditions

不平衡 情况	A 相 电流/A	B 相 电流/A	C 相 电流/A	N 线 电流/A	总损耗/ W
三相平衡	13.18	13.18	13.18	39.55	949.87
情况 1	7.71	13.01	19.66	40.35	1 021.84
情况 2	10.25	10.25	19.73	40.16	1 007.67
情况 3	7.76	16.19	16.19	40.11	999.24
情况 4	7.14	7.14	28.28	42.36	1 228.07
情况 5	7.80	28.28	28.28	48.93	1 846.83

从表 5 可以得出,谐波在三相不平衡下的损耗大于三相平衡时的损耗。下面再叠加之前基波的三相不平衡线损情况,如表 6。

表 6 两种情况下的线损比较

Table 6 Comparison of line loss in two cases

不平衡情况	$(\Delta P_{\text{single}}/W)/\sigma_{\text{single}}$	$(\Delta P_{\text{complex}}/W)/\sigma_{\text{complex}}$	β
情况 1	6 278.44/30.59%	6 350.38/32.09%	1.5%
情况 2	6 207.67/29.12%	6 265.47/30.32%	1.2%
情况 3	6 079.87/26.46%	6 129.05/27.49%	1.03%
情况 4	8057.36/67.59%	8335.56/73.38%	5.79%
情况 5	10514.51/118.70%	11411.47/137.36%	18.66%

表 6 中的 ΔP_{single} 是三相不平衡与谐波单独作用于线路时导致的线损之和; $\Delta P_{\text{complex}}$ 是三相不平衡与谐波两种电能质量共同作用于线路时的损耗, β 是两种不同情况下的线损增比之差。为了更加直观明确地比较,将之制成如图 4 所示柱状图。

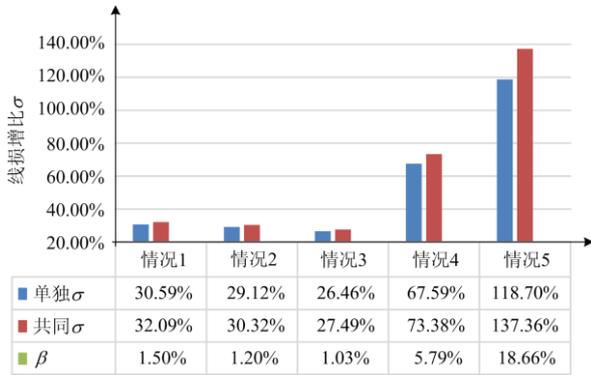


图4 两种不同情况下的线损比较图

Fig. 4 Comparison of line loss in two different cases

由图4可以直观地看出,当线路中同时存在谐波及三相不平衡时的线损大于各自单独存在时造成的线损之和,三相不平衡加剧了谐波线损,加重程度与三相不平衡度成正相关特性。

5 实验

为了更进一步验证实验结论,本次实验还使用了仪器 chroma 6590 可编程交流电源和一系列功率电阻来进行实验。本次实验借助 chroma 6590 可编程交流电源发出所需的三相电压波形和可任意编辑的谐波电压波形来进行实验,如图5所示。



图5 chroma 6590 可编程交流电源图

Fig. 5 chroma 6590 programmable AC power source

为了简化实验,线路阻抗和负载均使用大功率线绕电阻代替。参数选取按照贵州某县台区的数据,如表7所示。该台区采取三相四线制输电方式,为约40个用户供电,配变的合同容量(400 kVA),互感器综合倍率120(电压互感器倍率为1,电流互感器倍率为120),近月来线损率约10%。

表7 贵州电网某配电台区的参数

Table 7 Parameters of a power distribution station in Guizhou power grid

计量点名称	A相 电流/A	A相 电压/V	线损率/ %
10 kV 永阳线环城路 III 号变	0.187	239.0	8.85
10 kV 永阳线环城路 III 号变	0.182	238.7	9.37
10 kV 永阳线环城路 III 号变	0.174	238.7	9.62
10 kV 永阳线环城路 III 号变	0.173	239.0	9.58
10 kV 永阳线环城路 III 号变	0.171	238.9	9.69
10 kV 永阳线环城路 III 号变	0.188	238.6	9.77
10 kV 永阳线环城路 III 号变	0.168	239.4	9.89

在用电低谷期,该台区等效单相阻值 R 约为

$$R = \frac{239}{0.182 \times 120} \approx 11 \Omega \quad (21)$$

线路与采用负载均采用功率因数为1的纯电阻代替。按照精度为5%的E24系列标称阻值和线损率10%取值,线路电阻约 1Ω ,负载阻值约 10Ω 。

本次实验选用能承受较大功率的RX20系列电阻,此功率电阻能承受高达200W的功率,如图6所示。按照线绕电阻的100W功率计算(考虑成本),那么电压源将降到约30V。根据实际购买的电阻,可以组成一种三相不平衡情况:A相负荷 20Ω ,B相负荷 5Ω ,C相负荷 5Ω 。



图6 功率电阻实验图

Fig. 6 Power resistance experimental diagram

5.1 三相不平衡线损的实验

在该次实验中,三相电压源设置为每相正弦电压30V(有效值),相位依次相差 120° 。分别调整负荷情况至上述的平衡状态和不平衡情况,接下来测量线路的三相电流与中性线的电流,数据如表8。

由表8数据可得,三相平衡时的线损小于三相不平衡时的线损,具体情况视不平衡程度而定。

表 8 三相不平衡的线损情况

Table 8 Line loss under three-phase unbalance

电流及功率	三相平衡	三相不平衡
A 相电流/A	2.72	1.57
B 相电流/A	2.72	4.60
C 相电流/A	2.72	4.60
N 相电流/A	0	2.33
线路功率/W (A/B/C)	7.37/7.37/7.37	2.47/21.12/21.12
负载功率/W (A/B/C)	73.71/73.71/73.71	49.30/105.62/105.62
中性线功率/W	0	5.45

5.2 谐波线损的实验

先设定系统中三相负荷平衡，在电源侧加入四次谐波电压源，同时，使三相电压源无效化。线路电阻变为 $1 \times \sqrt{4} = 2 \Omega$ (由于其他次数谐波对应的电阻需要额外定制，选择四次谐波对应的电阻不影响结论的验证)。通过依次改变谐波幅值(10 V、15 V、20 V、25 V)来改变谐波含量，接下来测量线路和中性线的电流数据，结果如表 9。

表 9 四次谐波含量与线损

Table 9 Fourth harmonic content and line loss

电流及功率	10 V	15 V	20 V	25 V
A 相电流/A	0.813	1.266	1.655	2.086
B 相电流/A	0.813	1.266	1.655	2.086
C 相电流/A	0.813	1.266	1.655	2.086
N 相电流/A	0	0	0	0
线路功率/W	1.322×3	3.205×3	5.478×3	8.703×3
负载功率/W	6.610×3	16.027×3	27.390×3	43.513×3
中性线功率/W	0	0	0	0

由表 9 数据可以得出，线路功率随着谐波含量的增大而增大，且按照近似抛物线的增长趋势变化。同理，其他次数的谐波(负序谐波、零序谐波)变化规律和四次谐波(正序谐波)一致。

5.3 三相不平衡与谐波共同作用时的线损的仿真

本次实验在每相中加入恒定的四次谐波电压源(有效值 15 V)和调整三相负荷来进行验证。接下来测量线路和中性线的电流数据，如表 10 所示。

由表 10 可以看出，谐波在三相不平衡的线损大于三相平衡时的线损，具体情况视不平衡情况而论。为了更加直观地表示损耗情况，制成如表 11。

从表 11 的数据可以得出，当线路中同时存在谐波及三相不平衡时的线损大于各自单独存在时造成的线损之和，即三相不平衡加剧谐波情况下的线损，交叉影响使得线损进一步增大。

表 10 三相不平衡情况下的四次谐波线损

Table 10 Fourth harmonic line loss under three-phase unbalance

电流及功率	三相平衡	三相不平衡
A 相电流/A	1.266	0.750
B 相电流/A	1.266	1.980
C 相电流/A	1.266	1.980
N 相电流/A	0	0.863
线路功率/W (A/B/C)	3.205/3.205/3.205	1.125/7.840/7.840
负载功率/W (A/B/C)	16.027/16.027/16.027	11.250/19.600/19.600
中性线功率/W	0	1.490

表 11 两种情况下的线损比较情况

Table 11 Line loss comparison in both cases

三相不平衡与谐波的情况	单独作用时的损耗	共同作用时的损耗
线路总损耗/W	59.771	68.451

6 总结

本文分别通过理论推导和实验来分析三相不平衡与谐波单独作用与共同作用时对线损的影响。首先，分别推导三相不平衡与谐波单独作用于线路上的理论线损计算公式，然后推导出不平衡及谐波同时作用于线路上的理论线损计算公式，最后运用对称分量法对这两种不同情况下的理论线损进行比较，并通过 Matlab/Simulink 仿真工具和 chroma 6590 可编程交流电源对每一部分分别进行实验来进行验证。结果表明，当线路中同时存在三相不平衡与谐波时，其所造成的线损大于单一电能质量存在时造成的线损之和，并且随着三相不平衡度与谐波含量的增加，其正相关特性愈加显著。随着节能降耗政策的持续推进，对于复合电能质量的损耗计算具有重要的现实意义。因此，根据本文的研究，对于电网中高线损的降低，应该从多个电能质量问题方面进行综合考虑和治理，才能达到最佳的效果。

参考文献

[1] 尹忠东, 张静. 复合电能质量扰动下配电网关键设备加损耗的研究[J]. 电气应用, 2019, 38(3): 12-20.
YIN Zhongdong, ZHANG Jing. Study on loss of key equipment in power distribution network under composite power quality disturbance[J]. Electrical Applications, 2019, 38(3): 12-20.

[2] 杨文锋, 王彬宇, 程卓, 等. 城市中低压配电网降损规划决策方法[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2598-2604.
YANG Wenfeng, WANG Binyu, CHENG Zhuo, et al. Optimized decision approach of loss reduction plan for medium-and low-voltage urban distribution networks[J].

- Power System Technology, 2014, 38(9): 2598-2604.
- [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 Junqin. The circuit loss rate analysis of three-phase unbalanced circuit[J]. Journal of Electric Power, 2001, 16(2): 91-93.
- [4] 怀全, 侯小虎, 何良策, 等. 一种含分布式电源的中低压配电网状态估计方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 69-77.
HUAI Quan, HOU Xiaohu, HE Liangce, et al. A method of state estimation for middle voltage and low voltage distribution network with distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 69-77.
- [5] 吴志力, 王旭阳. 关于“十三五”配电网规划实施的思考[J]. 中国电力, 2017, 50(1): 25-29.
WU Zhili, WANG Xuyang. Reflections on the implementation of the 13th five-year plan for distribution network[J]. Electric Power, 2017, 50(1): 25-29.
- [6] 刘开俊. 关于“十三五”电网规划若干重大问题的思考[N]. 国家电网报, 2015-12-23(001).
LIU Kaijun. Thoughts on several major issues in the 13th five-year plan for power grid[N]. Journal of State Grid, 2015-12-23(001).
- [7] 徐琴, 柳劲松, 韩伟福, 等. 配电网建设现状及发展趋势分析[J]. 华东电力, 2013, 41(12): 2532-2535.
XU Qin, LIU Jinsong, HAN Weifu, et al. Status quo and development trend of distribution network construction[J]. East China Electric Power, 2013, 41(12): 2532-2535.
- [8] 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 Xiaoli, LI Huiling, SHENG Wanxing. Development and implementation of line loss systematic management system for provincial, municipal and county distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 87-90.
- [9] 冯成, 徐长宝, 李怀宇, 等. 三相电流不平衡及谐波对电网损耗的影响分析[J]. 电气应用, 2016, 35(13): 47-52.
FENG Cheng, XU Changbao, LI Huaiyu, et al. Analysis of three phase current unbalance and harmonic influence on power loss[J]. Electrical Applications, 2016, 35(13): 47-52.
- [10] 倪峰, 余健明, 潘忠美. 基于瞬时三相不平衡度的低压电网线损理论计算[J]. 西安理工大学学报, 2008, 24(3): 349-354.
NI Feng, YU Jianming, PAN Zhongmei. Low-voltage distribution network theoretical energy loss calculation based on real-time unbalance in three phases[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008, 24(3): 349-354.
- [11] 朱紫钊, 叶发新. 一种低压配电网理论线损计算的改进算法[J]. 电测与仪表, 2012, 49(11): 6-10.
ZHU Zizhao, YE Faxin. Improved method for theoretical line loss calculation of low-voltage distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(11): 6-10.
- [12] 郭峰, 姚莉娜, 刘恒, 等. 引入三相不平衡度的低压电网理论线损计算[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(11): 51-54.
GUO Feng, YAO Lina, LIU Hengli, et al. Theoretical line loss calculation with three-phase unbalance degree for low-voltage distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11): 51-54.
- [13] 陶用伟, 朱勇, 李泽群. 计及三相不平衡的配电网损耗计算分析[J]. 信息技术, 2019(7): 82-85.
TAO Yongwei, ZHU Yong, LI Zequn. Calculation and analysis of distribution network loss considering three-phase unbalance[J]. Information Technology, 2019(7): 82-85.
- [14] JAWAD GHORBANI M, MOKHTARI H. Impact of harmonics on power quality and losses in power distribution systems[J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2015, 7(1): 47-52.
- [15] 何延辉. 配电变压器三相负荷不平衡对线损的影响[J]. 电子制作, 2015(1): 268-269.
HE Yanhui. Influence of three-phase load unbalance on line loss of distribution transformer[J]. Electronic Production, 2015(1): 268-269.
- [16] 王释颖, 赵莉华, 卢孔实, 等. 谐波电流作用下变压器损耗及绝缘寿命的计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(7): 79-82.
WANG Shiyong, ZHAO Lihua, LU Kongshi, et al. Calculation of transformer loss and insulation life under harmonic currents[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(7): 79-82.
- [17] 陈小飞, 邱泽晶, 王振宇. 谐波放大对配电电缆的损耗影响分析及谐波抑制技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(6): 76-81.
CHEN Xiaofei, QIU Zejing, WANG Zhenyu. Influence of harmonic amplification on the loss of distribution cable and harmonic suppression technology[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2016, 37(6): 76-81.
- [18] 张秀磊, 蔺红. 电动汽车充电机(站)的谐波影响分析[J]. 新能源汽车供电技术, 2018, 2(3): 39-43.
ZHANG Xiulei, LIN Hong. Analysis of harmonic influence of electric vehicle charger (station)[J]. New

- Energy Vehicle Power Supply Technology, 2018, 2(3): 39-43.
- [19] 胡应宏, 王建斌, 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, 32(34): 98-104.
HU Yinghong, WANG Jianze, REN Jiajia, et al. Balance component decomposition and compensation method for unbalanced load[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 98-104.
- [20] 蔡从楠, 迟屹楠, 黄焕强. 基于正负序迭代的配电网三相不平衡控制研究[J]. 供用电, 2019, 36(4): 56-63.
CAI Congnan, CHI Yinan, HUANG Huanqiang. Research on three-phase unbalance control of distribution network based on positive and negative sequence iteration[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(4): 56-63.
- [21] 张志文, 陈明飞, 胡斯佳, 等. 基于星形三角形接线多功能平衡变压器的负序和谐波综合治理系统[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 159-165.
ZHANG Zhiwen, CHEN Mingfei, HU Sijia, et al. Comprehensive negative-sequence and harmonic suppression system based on Y-D multi-function balance transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 159-165.
- [22] 陈子辉, 麦荣焕, 倪惠浩, 等. 计及电能质量因素的变压器能效分析[J]. 供用电, 2020, 37(5): 64-72.
CHEN Zihui, MAI Ronghuan, NI Huihao, et al. Energy efficiency analysis of transformers considering power quality factors[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(5): 64-72.
- [23] 吴丽, 郑昕, 朱小红, 等. 三相四线制系统中计及零序电流特性的分布式电源逆变器有功和无功功率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 126-133.
WU Li, ZHENG Xin, ZHU Xiaohong, et al. Active and reactive power control with zero sequence current characteristics for distributed generation inverters in three-phase four-wire system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 126-133.
- [24] 中国国家标准化管理委员会. 电能质量三相电压不平衡: GB/T 15543—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
China National Standardization Administration. Power quality three-phase voltage imbalance: GB/T 15543—2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [25] YUAN Yubo, LI Peng, KONG Xiangpingi, et al. Harmonic influence analysis of unified power flow controller based on modular multilevel converter[J]. Journal of Modern Power System and Clean Energy, 2016, 4(1): 10-18.
- [26] 王纲, 李剑飞, 陈隆道, 等. 一种基于频率补偿的改进插值谐波分析算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 1-7.
WANG Gang, LI Jianfei, CHEN Longdao, et al. An improved interpolation harmonic analysis algorithm based on frequency compensation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 1-7.
- [27] KRISHNAMURTHY S, BANINGOBERA B E. IEC61850 standard-based harmonic blocking scheme for power transformers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 121-135. DOI: 10.1186/s41601-019-0123-7.
- [28] 中国国家标准化管理委员会. 电能质量公用电网谐波: GB/T 14549—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
China National Standardization Administration. Power quality utility harmonic: GB/T 14549—1993[S]. Beijing: China Standards Press, 1993.
- [29] CIRINO A W, DE PAULA H, MESQUITA R C, et al. Cable parameter variation due to skin and proximity effects: determination by means of finite element analysis[C] // 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, November 3-5, 2009, Porto, Portugal: 4073-4079.
- [30] TOFOLI F L, SANHUEZA S M R, DEOLIVEIRA A. On the study of losses in cables and transformers in nonsinusoidal conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 971-978.

收稿日期: 2019-12-19; 修回日期: 2020-04-01

作者简介:

谢荣斌(1970—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 研究方向为计量自动化技术; E-mail: xrb123@sina.com

杜帆(1989—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为配网设备技术管理; E-mail: 690908774@qq.com

程湘(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电能质量. E-mail: 2464440103@qq.com

(编辑 姜新丽)