

谐波标准下的配电网理论线损研究

曹庆¹, 朱俊², 谢荣斌², 周群¹, 闫东辉¹

(1. 四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065;

2. 贵州电网 息烽供电分公司, 贵州 息烽 551100)

摘要: 为了准确计算电网理论线损, 考虑谐波环境下趋肤效应对阻值的影响, 结合等值电阻法, 对传统理论线损计算公式进行修正。运用提出的修正式子, 通过两个算例, 验证谐波对 10 kV 及以下配网理论线损的影响。算例一根据《GB/T 14549—1993 电能质量公用电网谐波》中规定的公共连接点 PCC 注入谐波电流的允许值, 计算某地区电网由谐波标准规定允许的谐波含量所造成的额外损耗; 算例二根据实测数据计算出某加工厂 380 V 侧线路损耗。有效分析了谐波含量对配电网线损的影响, 证明了将谐波造成的额外损耗计入理论线损中的必要性。

关键词: 谐波标准; 理论线损; 趋肤效应; 等值电阻法; 谐波电流畸变率

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed20718

Research on Theoretical Line Loss of Distribution Network Under Harmonic Standard

CAO Qing¹, ZHU Jun², XIE Rongbin², ZHOU Qun¹, YAN Donghui¹

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

2. Xifeng Power Supply Branch, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Xifeng 551100, Guizhou, China)

Abstract: In order to calculate the theoretical line loss accurately, traditional theoretical line loss formula was revised according to the equivalent resistance method of skin effect with harmonic. By the revised calculation formula proposed, two examples were given to verify the influence of harmonics on theoretical line loss of distribution network with 10 kV and below. Example 1: according to the allowable value of injecting harmonic current into PCC (point of common coupling) stipulated in 《GB/T 14549—1993 Harmonics of Power Quality Public Power Grid》, the additional losses caused by the allowable harmonic content were calculated. Example 2, the loss of 380 V line in the processing plant was calculated, on the basis of the measured data and the modified formula. The influence of harmonic content on line loss of distribution network was analyzed effectively, and the necessity of incorporating additional loss caused by harmonic into theoretical line loss was proved.

Key words: harmonic standard; theoretical line loss; skin effect; equivalent resistance method; harmonic current distortion rate

由于线损是电网公司运营的主要经济指标, 各电网公司一直将线损率作为考核自己经营管理的主要标准之一。近年来, 随着各项降损措施的有效投入, 电网线损率基本达到了合理的范围。据统计, 目前我国电网的综合线损率约 6.50%, 而其中中、低压配电网运行引起的线损占整个电网系统运行损耗的 50%。在发达城市地区, 线损率每波动 0.01 个百分点, 将影响到几百万 kW·h 的电量^[1]。可见, 挖掘引起配电网损耗的潜在因素存在巨大的经济价值。

当今, 随着分布式能源和非线性负荷的大量引入, 电能质量对电网设备、电网稳定性的影响以及由谐波引起额外损耗的问题逐渐引起了人们的关注^[2]。目前对谐波的研究主要分为两类: 一是针对分布式能源、变频器等非线性元件发射谐波特性及谐波治理研究, 例如光伏发电、电气化铁路系统、电动汽车充电系统等^[3-4]; 二是谐波对传输线路及设备稳定性、等效阻值的影响研究, 例如对不同频率激励下变压器涡流损耗研究和谐波放大对配电电缆的损耗影响研究等^[5-7], 很

基金项目: 贵州电网公司科技项目 (GZKJXM20171037)

作者简介: 曹庆 (1992—), 男, 硕士, Email: 853889473@qq.com

多学者针对谐波对线路以及变压器的等效阻值影响提出了不同的计算模型^[8-13]。上述文献证明了研究谐波对配电网线损影响的必要性,但并没有具体量化配电网中谐波造成线损的比重,由于配电网结构复杂,文献里介绍的很多方法,大都是针对单个设备受谐波影响的理论研究,没有整体计算谐波对配电网线损的影响,现有的理论线损计算公式也没有考虑谐波对配电网线损影响。

文中首先考虑谐波环境下电网阻抗的变化特性,对传统理论线损计算时所采用的等值电阻法进行相应修正。其次,根据谐波标准规定的允许谐波电流值结合实际电网,通过文中提出的修正式子计算分析谐波标准对应下的额外损耗。最后,结合实测数据计算分析,验证了将由谐波引起的损耗计及到理论线损中,指导日常管理线损是有必要的。

1 谐波引起的线损估算原理

基于等值电阻法,考虑谐波对线路以及变压器等值电阻的影响,修正传统线损的计算公式。

1.1 等值电阻法

由于配电网的节点多、分支线多、元件也多,且多数元件不具备测录运行参数的条件,依据《电力网电能损耗计算导则》相关规定,工程上计算配电网线损时,一般采用等值电阻法。等值电阻法是将配电网线损看成两部分:变压器铁心的不变损耗 ΔA_R ;线路和变压器绕组产生的可变损耗 ΔA_L 和 ΔA_o 。线损公式如下:

$$\Delta A = \Delta A_L + \sum \Delta A_r(j) + \sum \Delta A_R(j) \quad (1)$$

其中三相平衡线路上传统理论线损的计算公式为

$$P_1 = (I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2) \times (R_{DC} + R_{T1}) \quad (2)$$

式中: I_{a1}, I_{b1}, I_{c1} 分别为平衡三相线路的三相电流有效值; R_{DC} 为线路直流电阻; R_{T1} 为变压器在基波下的等值电阻。

1.2 考虑谐波影响下线路及变压器等值电阻的修正

上述计算线路损耗的公式只适用于计算基波电流引起的线损,而实际电网中都存在谐波,如果考虑谐波引起的线损,则需要对式(2)进行修正。

在谐波环境下,趋肤效应会使线路及变压器上等效阻值增大,并且谐波畸变越高,趋肤效应越明显,等效阻值越大,造成配电网损耗越大^[8-13]。

计及趋肤效应影响下的线路谐波电阻 R_h 表示为

$$R_h = R_{DC} (1 + y_{s,h}) \quad (3)$$

其中

$$y_{s,h} = \begin{cases} \frac{x_{s,h}^4}{192 + 0.8x_{s,h}^4} & (0 < x_{s,h} \leq 2.8) \\ 0.0563x_{s,h}^2 - 0.0177x_{s,h} - 0.136 & (2.8 < x_{s,h} \leq 3.8) \\ \frac{x_{s,h}}{2\sqrt{2}} - \frac{11}{15} & (3.8 < x_{s,h}) \end{cases}$$

$$x_{s,h}^2 = \frac{8\pi f_1 h}{R_{DC}} \times 10^{-7}$$

式中: $y_{s,h}$ 为趋肤效应因数; f_1 为基波频率; h 为谐波次数。

由于导线温度的变化,会引起线路直流电阻 R_{DC} 变化,根据文献[11]表述,考虑温度变化引起线路阻值变化的修正公式为

$$R_{DC} = R_{dc} [1 + \alpha_T (T_p - 20)] \quad (4)$$

式中: R_{dc} 为20℃时电缆的直流电阻值; α_T 为温度修正系数(铜为0.003 93,铝为0.004 03); T_p 为电缆的平均工作温度。

根据文献[12-13],变压器在谐波环境下的等值电阻可以表示为

$$R_{Th} = \sqrt{h} R_{T1} \quad (5)$$

式中: R_{Th} 为变压器在 h 次谐波环境下的等值电阻。

1.3 计及谐波损耗的配电网理论线损修正式子

综合上述关于谐波环境下线路及变压器等值阻值修正的分析,结合传统的理论线损计算公式可得, h 次谐波引起线路损耗 P_{Lh} 为

$$P_{Lh} = I_h^2 R_{DC} (1 + y_{s,h}) \quad (6)$$

式中: I_h 为对应次数下谐波电流的有效值。

h 次谐波引起变压器损耗 P_{Th} 为

$$P_{Th} = I_h^2 \sqrt{h} R_{T1} \quad (7)$$

则配电网单相理论线损修正式子可以表示为

$$P = P_{L1} \sum_{h=1} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 (1 + y_{s,h}) + P_{T1} \sum_{h=1} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \sqrt{h} \quad (8)$$

式中: P_{L1}, P_{T1} 分别为线路和变压器在基波下线路的损耗; I_1 为基波电流有效值; P 为电网计及谐波影响的总损耗功率。

由谐波引起的额外损耗功率 ΔP 为

$$\Delta P = P_{L1} \sum_{h=2} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 (1 + y_{s,h}) + P_{T1} \sum_{h=2} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \sqrt{h} \quad (9)$$

设谐波引起线路损耗的变化系数为 K_1 ,谐波引起变压器损耗的变化系数为 K_2 ,则有:

$$K_1 = \sum_{h=2} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 (1 + y_{s,h}) \quad (10)$$

$$K_2 = \sum_{h=2} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \sqrt{h} \quad (11)$$

则式(9)可以表示为

$$\Delta P = K_1 P_{L1} + K_2 P_{T1} \quad (12)$$

电流总畸变率THD₁为

$$\text{THD}_1 = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} I_h^2}}{I_1} \quad (13)$$

结合式(9)、式(13)整理可得,由谐波引起的损耗功率 ΔP 为

$$\Delta P = \text{THD}_1^2 P_{L1} + \sum_{h=2} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 (P_{L1} y_{s,h} + P_{T1} \sqrt{h}) \quad (14)$$

1.4 谐波对配电网理论线损的影响分析

由于谐波污染严重的线路中,一般都以某次谐波含量较高,占比最大。所以假设某段低压配电网中仅含某次特定谐波,分别以5,7,11次谐波为例,对比分析 K_1, K_2 系数随谐波总畸变率变化的趋势如图1所示。

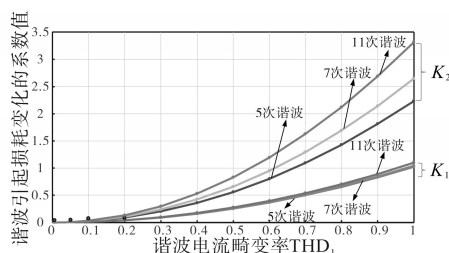


图1 谐波电流畸变率与损耗系数曲线图

Fig. 1 Harmonic current distortion rate and loss coefficient curves

从图1中可以看出,在谐波电流畸变率相同时,谐波次数越高,谐波对变压器损耗影响系数 K_2 值以及对线路损耗影响系数 K_1 值都越大,谐波引起额外损耗增大的效果越明显。

在相同谐波次数,相同电流畸变率下,谐波对变压器损耗影响系数 K_2 大于谐波对线路损耗影响系数 K_1 ,并且随着谐波电流总畸变率的增大, K_1, K_2 差值也逐渐增大。可以看出,谐波对变压器损耗的影响比谐波对线路损耗的影响更显著。

从式(14)中可以看出,谐波各次畸变率以及谐波总畸变率都对电网的损耗有一定影响。同样假设某段低压配电网中仅含某次特定谐波,也分别以5,7,11次谐波为例。据调查,配电变压器

损耗约占整个配电网损耗的60%至80%^[14],设某电网线路上的损耗为3 kW,变压器损耗为7 kW,做出某次谐波随电流总畸变率的变化所引起损耗变化的曲线图,如图2所示。

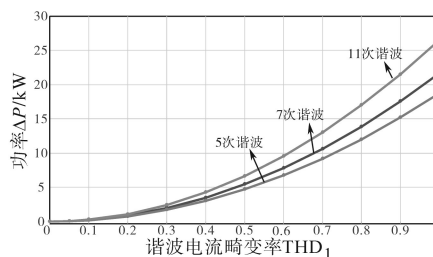


图2 谐波电流畸变率与谐波损耗曲线图

Fig.2 Harmonic current distortion rate and harmonic loss curves

由图2可以看出,在相同畸变率时,谐波次数越高,引起的额外损耗也越大。

对于任一次谐波,谐波电流畸变率越高,谐波引起的额外损耗越大。

2 考虑谐波标准的配电网线损估算

目前电网公司并未对谐波造成的损耗足够重视。为了分析计算这部分损耗,假设电网在满足谐波标准的规定下,计算出由标准规定的这部分允许存在的谐波电流带来的额外损耗,评估其经济损失。

2.1 谐波标准相关规定

GB/T 14549—93标准中规定,10 kV及以下配电网中公共连接点的全部用户向该点注入的谐波电流分量(方均根值)不应该超过表1中规定的允许值。

表1 谐波电流允许值

Tab.1 Harmonic current allowable value

标准电压/ kV	基准短路容量/ MV·A	谐波次数及谐波电流允许值/A							
		2	3	4	5	6	7	8	
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	
10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	
标准电压/ kV	基准短路容量/ MV·A	谐波次数及谐波电流允许值/A							
		9	10	11	12	13	14	15	
0.38	10	21	16	28	13	24	11	12	
10	100	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9	3.7	4.1	
标准电压/ kV	基准短路容量/ MV·A	谐波次数及谐波电流允许值/A							
		16	17	18	19	20	21	22	
0.38	10	9.7	18	8.6	16	7.8	8.9	7.1	
10	100	3.2	6	2.8	5.4	2.6	2.9	2.3	

当电网公共连接点的最小短路容量不同于表1基准短路容量时,按下式换算谐波电流:

$$I_h = \frac{S_{k1}}{S_{k2}} I_{hp} \quad (15)$$

式中: S_{k1} 为公共连接点的最小短路容量; S_{k2} 为基准短路容量; I_{hp} 为表1中基准短路容量下的第 h 次谐波电流允许值; I_h 为短路容量为 S_{k1} 时的第 h 次谐波电流允许值。

在PCC点处第 i 个用户的第 h 次谐波电流允许值 I_{hi} 按下式计算:

$$I_{hi} = I_h (S_i/S_1)^{1/\alpha} \quad (16)$$

式中: I_h 为按式(15)换算的第 h 次谐波电流允许值; S_i 为第 i 个用户的用电协议容量; S_1 为公共连接点的供电设备容量; α 为相位迭加系数。

2.2 短路容量计算

式(15)中,所涉及的最小短路容量是指系统在最小运行方式下的短路容量,计算公式为

$$S_{k1} = \sqrt{3} U_{av} I_{k1} \quad (17)$$

用标么值表示为

$$S_{k1} = I_{k1*} S_{k2} = \frac{S_{k2}}{X_{\Sigma*}} \quad (18)$$

式中: U_{av} 为线路的平均电压; I_{k1} (I_{k1*}) 为短路电流有效值(标么值); $X_{\Sigma*}$ 为系统总的短路阻抗标么值。

2.3 某电网PCC处谐波电流允许值计算

图3为某地区电力网络简化图。图3中变压器 T_1 的相关参数为: $U_1/U_2=110/10.5$ kV, 额定容量为 $50 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 短路电压 $U_d=10.5\%$, 负载损耗 $P_k=216 \text{ kW}$, 空载损耗 $P_0=59.7 \text{ kW}$ 。变压器 T_2 的相关参数为: $U_1/U_2=10/0.4$ kV, 额定容量为 $1.25 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 短路电压 $U_d=5.44\%$, 负载损耗 $P_k=8.46 \text{ kW}$, 空载损耗 $P_0=1.83 \text{ kW}$ 。

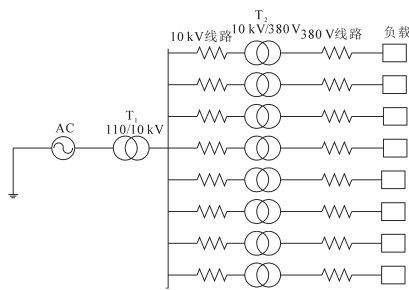


图3 某地区电网接线图

Fig. 3 Wiring diagram of a regional power network

将 T_1 变压器阻抗值归算到 10 kV 侧标么值为 0.21 。由供电公司所给资料表明,该 10 kV 以上线路的标么值为 0.14 。根据式(18)可得,公共连接点变压器 T_1 处的短路容量为

$$S_{CC1} = 285.714 \text{ MV}\cdot\text{A}$$

根据式(15)可以得到变压器 T_1 处的谐波电流允许值。再将公共连接点谐波电流允许值分配到其中一条支路,由式(16)可得,其中一条 10 kV 支路的允许电流值如表2所示。

表2 T_1 变压器处其中一条支路谐波电流允许值

谐波次数	2	3	4	5	6	7
谐波电流允许值/A	11.737	2	5.869	2.629	3.837	3.086
谐波次数	8	9	10	11	12	13
谐波电流允许值/A	2.889	3.07	2.302	3.428	1.941	3.228
谐波次数	14	15	16	17	18	19
谐波电流允许值/A	1.67	1.851	1.445	2.709	1.264	2.438

由供电公司所给资料表明,该网络某一台 T_2 变压器高压侧 10 kV 及以上线路阻抗标么值为 0.36 。将其归算到 0.4 kV 侧后的标么值为 0.036 。将 T_2 变压器等效阻抗值归算到 0.4 kV 侧后的标么值为 0.4352 。由式(16)可得,公共连接点变压器 T_2 处的谐波电流允许值为表3所示。

表3 其中一台 T_2 变压器谐波电流允许值

谐波次数	2	3	4	5	6	7
谐波电流允许值/A	165.532	131.576	82.766	131.576	55.177	93.377
谐波次数	8	9	10	11	12	13
谐波电流允许值/A	40.322	44.566	33.955	59.422	27.589	50.933
谐波次数	14	15	16	17	18	19
谐波电流允许值/A	23.344	25.466	20.585	38.2	18.251	33.955

假设该网络结构满载负载率恒定运行,则对应情况下的谐波电流畸变率为: 10 kV 线路满载运行时谐波电流畸变率为 23.17% 。 380 V 线路满载运行时谐波电流畸变率为 17.24% 。可以看出,即使线路电流满足谐波电流标准规定限值,电流也存在较大的畸变。

2.4 线路损耗计算及分析

根据供电公司提供资料, 10 kV 线路型号为 LGJ-185, 电阻值为 $0.17 \Omega/\text{km}$, 线路长度为 2 km 。低压侧 380 V 出线电缆为铝芯交联聚乙烯绝缘线, 电缆截面积 120 mm^2 , 电阻值为 $0.253 \Omega/\text{km}$, 线路长度为 0.1 km 。由 T_1 、 T_2 变压器的数据可以得出, T_1 变压器归算到 10 kV 侧的电阻值 $R_{T1}=2.592 \times 10^{-2} \Omega$ 。 T_2 变压器归算到 380 V 侧的电阻值 $R_{T2}=2.599 \times 10^{-3} \Omega$ 。

根据式(9)、式(14)可以得出 10 kV 线路(含 T_1 变压器)和 380 V 线路(含 8 台 T_2 变压器)各次谐波的损耗如图 4 所示。

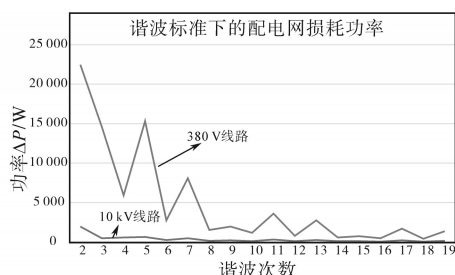


图4 各次谐波损耗份额

Fig.4 Each harmonic loss share

从图4可以看出,该电网结构在谐波标准下的损耗,380 V线路大于10 kV线路。其中,由奇次谐波引起的损耗大于偶次谐波引起的损耗。谐波次数越高,谐波含量越低,所引起的损耗越小。

在该电力网络结构中,10 kV 及以下电网线路由谐波标准电流引起的损耗总功率为 92 167.5 W。假设电价为 0.5 元/度,一年该电网结构由谐波标准规定允许的谐波含量所造成的额外损耗接近 40.4 万元。

对配电网线路各部分损耗计算统计如图 5~图 7 所示。其中,标准谐波电流在变压器中引起的损耗所占比例较大。8 台 T_2 变压器,由谐波标准下谐波电流引起的额外损耗占满载时基波损耗的 15.78%,占 50% 负载率时基波损耗的 41.17%。

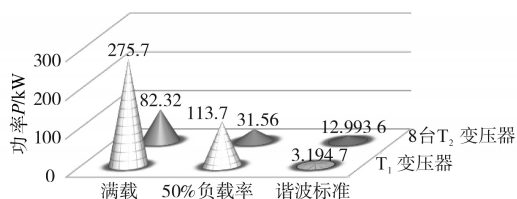


图5 不同负载率下的变压器谐波损耗占比

Fig.5 Harmonic loss proportion of transformer under different load rates

10 kV 线路(24 条线路)上,谐波标准下谐波电流引起的额外损耗占满载时基波损耗的 5.8%,占 50% 负载率时基波损耗的 25%。380 V 线路(24 条线路)上,谐波标准下谐波电流引起的额外损耗占满载时基波损耗的 3.07%,占 50% 负载率时基波损耗的 12.3%。

380 V 低压侧线路损耗所占配电网总线损的份额较大,其中该网络结构正常满载情况下,380 V 线路基波损耗占全网线路基波总损的 88%;谐波标准下,380 V 线路谐波额外损耗占全网线路谐

波总损的 93%。



图6 不同负载率下的线路谐波损耗占比

Fig.6 Harmonic loss ratio under different load rates

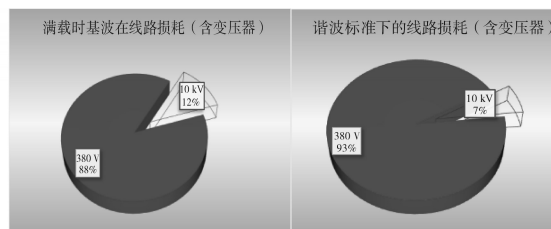


图7 线路损耗比例分布

Fig.7 The proportion of distribution line loss

通过上述分析表明,在该电网上,10/0.38 kV 变压器的谐波损耗占比最高,主要是因为配电变压器数量较多,且谐波对变压器等值电阻影响较大。其次是 380 V 配电网由谐波引起的损耗。全线路满载条件下的正常基波损耗功率为 2 712.263 kW。在该电网结构中,谐波标准下的线路总损耗占满载基波总损耗的 3.4%,占 50% 负载率时基波损耗的 12.26%;其中 380 V 侧电网(含 T_2 变压器)在谐波标准下的损耗占满载基波损耗的 3.61%,占 50% 负载率时基波损耗的 14.44%。

3 线路谐波损耗实测及计算

某加工厂所用变频电机等设备会引起线路电流的畸变,且由上述分析有 380 V 线路损耗所占总损耗份额较大,所以在加工厂变压器低压侧关口安装电能质量监测装置,实测某一时段 380 V 侧谐波电流,根据所测数据结合修正公式计算得到谐波下线路的额外损耗值,同时结合实际电网数据,换算得到谐波标准允许的该线路谐波电流值,计算出谐波标准下的额外损耗,与实测数据对比分析。

3.1 设备参数及实测谐波数据

加工厂所用变压器额定容量为 160 kV·A,负载损耗为 2.31 kW,空载损耗为 0.4 kW,380 V 侧线路阻值(基波情况下)为 0.030 4 Ω 。加工厂实测畸变电流数据如表 4,测量期间变压器和线路负载基波损耗分别为 1 955.5 W 和 3 275.4 W。电流总畸变率 THD_i 为 19.77%(电压畸变率满足谐

波标准5%以内,测试结果中偶次谐波含量较少,忽略不计)。

表4 实测各次谐波电流含量

Tab.4 Measurement of harmonic current content										
谐波次数	3	5	7	9	11	13	15	17	19	
I_h/A	3.1	29.9	14.2	0.1	11.5	9.2	0.5	6.5	6.3	

3.2 数据处理及分析

将所测的结果与标准规定下的该线路谐波电流标准对比分析,可以得到各奇次非零序谐波电流已接近标准规定限值。根据以上测量结果,计算得到380 V侧线路和10/0.4 kV变压器各次谐波损耗,如图8所示。

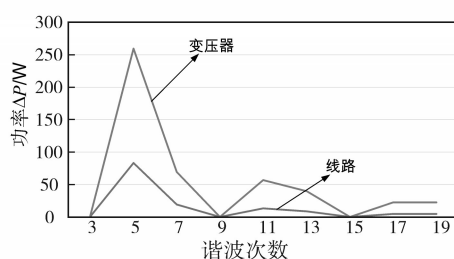


图8 实测各次谐波损耗功率

Fig.8 Measured harmonic loss power

从图8中可以看出,谐波在变压器中引起的额外损耗大于谐波在线路中引起的额外损耗。零序谐波引起额外损耗占比较少。5,7,11和13次谐波含量高,引起损耗占比大。

由谐波引起的变压器额外总损耗和线路额外总损耗分别为472 W和134.5 W,由谐波引起变压器损耗占比较大,占谐波引起总损耗的78%,验证了第1节理论分析中谐波对变压器损耗的影响比谐波对线路损耗的影响更显著的结论。

谐波引起的额外损耗占基波损耗比例如图9所示。变压器上,谐波引起的损耗约占基波引起损耗的23%。线路上,谐波引起的损耗约占基波引起损耗的4%。

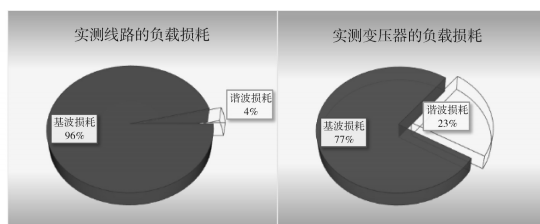


图9 谐波损耗占比

Fig.9 Harmonic loss ratio

谐波引起的变压器及线路总额外损耗之和占基波引起总损耗的11.51%。

从以上分析中可以看出,该线路谐波电流虽然未超过标准,但引起的线路额外损耗较大。假设在该工况下,电网公司统计该加工厂此段线路的理论线路损耗费用为100元,则还存在额外谐波引起的损耗费11.51元未计入。可见不考虑谐波影响,将造成线路理论线损偏小,在生产过程中,难以正确的指导电网的统计线损。

3.3 该线路在谐波标准下的分析

按照谐波标准,结合该线路参数,计算出该变压器出口侧谐波电流允许值如表5所示。

表5 谐波标准规定各次谐波电流含量

Tab.5 Harmonics standards stipulate the content of each harmonic current										
谐波次数	3	5	7	9	11	13	15	17	19	
I_h/A	21.8	21.8	15.4	7.4	9.8	8.4	4.2	6.3	5.6	

对比表4和表5可以看出,实际配电网380 V侧所含零序电流较少,奇次非零序谐波电流含量较大,且除7次谐波外,其他各奇次非零序谐波都已超过标准规定值。由于配电网中变压器二次侧一般采用三角形接法,很好地抑制了线路中的零序电流。因此在下列计算中,忽略谐波标准中对零序电流的规定,计算出谐波标准下的该线路总损耗为424.8 W,其中变压器在谐波标准下的损耗为333 W,线路在谐波标准下的损耗为91.8 W。

由上述分析可以看出,一些特殊企业线路,由于使用变频电机以及电力电子设备对线路电能质量造成了较大影响,线路上非零序奇次谐波电流甚至已经超过了标准规定。从本算例中可以看出对于用电设备特殊(变频电机、电力电子设备)的线路,为了精简成本,可以考虑以谐波标准下非零序奇次电流值估算线路的额外总损耗,将这部分损耗纳入理论线损之中。

4 结论

文中考虑谐波的影响,对传统的等值电阻法计算理论线损公式进行修正,提出配电网在谐波下线路损耗的计算式子。利用该修正式子,结合谐波标准及实测数据,计算谐波造成配电网损耗,量化电网中谐波造成线损的比重。并对10 kV, 380 V线路损耗以及各部件损耗进行对比分析。

结果表明,即使配电网线路满足谐波标准规定,线路上电流也存在较大畸变,且畸变越大造

成额外损耗越高,所以应对线路的电流畸变率引起重视;谐波在变压器及配电网低压侧上引起损耗较大,应对配电网低压侧谐波污染及谐波引起变压器额外损耗问题引起重视;配电网中由谐波引起的损耗占基波损耗的比例较大,涉及经济损失额度较高,不可忽略,为了精益化管理线损,准确地指导配电网实际生产中的管理线损,应当考虑将这部分损耗计入到理论线损中。

参考文献

- [1] 朱伟,王大成. 上海电网线损精细化管理的技术与实践[J]. 华东电力,2010,38(10):1618-1620.
- [2] 孙晓武,施火泉. 背景谐波电压影响公共连接点谐波电流的研究[J]. 电气传动,2010,40(6):38-42.
- [3] 周京华,祝天岳,曾鹏,等. 电气化铁路牵引供电系统研究现状及关键技术[J]. 电气传动,2015,45(6):3-9.
- [4] 张琦,晋鑫,刘佳昊,等. 具有低入网电流谐波的组合光伏发电系统研究[J]. 电气传动,2019,49(11):51-56.
- [5] 赵志刚,史文军,王振,等. 不同频率激励下变压器铜屏蔽中涡流损耗的研究[J]. 电工电能新技术,2017,36(3):58-64.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 王葵,李建超. 谐波电流对低压配电网的影响分析[J]. 继电器,2008,36(7):24-28.
- [9] Du Y, Burnett J. Experimental investigation into harmonic impedance of low-voltage cables[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2000, 147(6):322-328.
- [10] 徐政,钱洁. 电缆电气参数不同计算方法及其比较[J]. 高压电技术,2013,39(3):689-697.
- [11] Zhang Bin, Liu Yong, Zhao Kuo, *et al.* Transformer loss calculation and analysis driven by load harmonic[C]//2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2011: 1394-1398.
- [12] 刘书铭,施红,冯蕾. 考虑集肤效应与邻近效应的变压器谐波损耗模型[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):133-139.
- [13] 蔡国伟,孔令国. 基于频变特性的变压器谐波损耗分析[J]. 电网技术,2011,35(11):120-124.
- [14] 常炳双,辛健. 配电变压器经济运行模式的探讨[J]. 电网技术,2007,31(1):247-248.

收稿日期:2019-08-19

修改稿日期:2019-10-16

(上接第55页)

- [4] 杨旭. 电动汽车电机驱动系统实训台架设计及其故障试验[D]. 广州:华南理工大学,2017.
- [5] 王家校. 基于共直流母线的变频器对拖试验系统设计[J]. 电力电子技术,2014,7(48):10-12.
- [6] 范国伟,韩玉婷,史彦. 同步电机原理及应用技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2014.
- [7] 郑光泽,王振宇,王波. 永磁同步电机定子系统动态特性分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2019,6(33):53-58.

- [8] 陈丽香,潘敬涛,孙宁. 新能源汽车用永磁电机转子结构分析[J]. 电机与控制应用,2019,2(46):114-119.
- [9] 潘敬涛. 新能源汽车用永磁电机设计[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2019.
- [10] 柯意. 汽车变速器NEDC行驶工况台架试验研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2017.

收稿日期:2019-09-18

修改稿日期:2019-10-18