

文章编号:1671-6833(2018)01-0053-06

计及谐波因素的配电网损耗量化计算与建模仿真

魏超峰^{1,2}, 李琼林², 蒋建东¹, 唐钰政², 王 纯¹

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘 要: 准确的线损计算是分析线损构成、制定降损措施, 实现电网经济运行的基础. 配电网谐波污染日趋严重, 因谐波因素导致配电网运行状态及设备参数发生较大变化, 由此产生的附加损耗已不容忽视. 在分析传统线损计算方法的基础上, 系统分析了谐波对配电变压器及线路损耗的影响机理. 通过引入输电线路交流电阻系数和变压器谐波损耗因子, 提出一种计及谐波因素的线损计算模型, 并结合典型配电变压器及线路, 完成谐波对其损耗影响的量化计算. 最后通过建模仿真, 验证了模型的有效性和准确性.

关键词: 谐波; 线损; 交流电阻系数; 谐波损耗因子; 建模仿真

中图分类号: TM744 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.025

0 引言

配电网损耗是电力生产中的一个重要技术经济指标, 也是县级供电企业节能降损关注的主要问题之一^[1-2]. 配电网的理论线损计算则是线损分析、线损指标管理以及指导节能降损的主要依据. 由于线损计算涉及因素较多, 计算过程复杂, 以均方根电流法和等值电阻法等为代表的传统线损计算方法均进行了大量简化, 且均在工频条件下进行计算, 部分改进方法中, 也主要集中于考虑系统三相不平衡以及大量使用量测数据两个方面, 鲜有考虑谐波因素的影响^[3-5].

近年来, 随着新能源的快速发展及各类新型用电设备的广泛使用, 谐波问题对配电网的影响日趋严重. 部分商业用电负荷的测试结果显示^[6], 谐波电流总畸变率多数在 15%~30%, 个别高达 45%, 谐波问题引起的附加损耗已成为配电网理论线损计算中不可忽略的部分. 鉴于此, 笔者在全面分析传统线损计算方法的基础上, 采用交流电阻系数和谐波损耗因子来表征谐波环境集肤效应与涡流效应对线路及变压器的影响机理, 并结合典型配电变压器与线路, 对提出的线损模型量化分析, 最后搭建 Matlab 仿真模型, 对该模

型进行验证.

1 传统配电网损耗计算方法

根据电力网电能损耗计算导则的介绍, 由于配电网线路分支较多, 并且一直以来负荷元件 (配电变压器、低压负荷等) 都不具备测量条件, 因此配电网线损计算多采取简化处理, 常用的计算方法有如下几种.

(1) 均方根电流法. 均方根电流法是理论线损的基本计算方法. 设 R 为配电网中元件电阻, I 为流过该元件的电流有效值, 在某个周期 T 内该元件的电能为:

$$\Delta A = 3 \int_0^T I^2 R dt.$$

由于负荷曲线的解析表达式 $I = f(t)$ 无法准确获取, 上式积分难以求取. 通常假设每小时内电流值一定, 用代表日 24 h 正点负荷电流的测量值对上式进行分段积分计算. 设 I_i 为代表日 24 h 正点时刻负荷测量值, 则全天 24 h 元件电阻中的损耗为 $\Delta A = 3(I_1^2 + I_2^2 + \cdots + I_{24}^2)R$. 定义代表日方均

根电流 $I_{jf} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + \cdots + I_{24}^2}{24}}$, 上式可进一步简化为 $\Delta A = 72 I_{jf}^2 R$.

收稿日期:2017-08-20; 修订日期:2017-10-13
基金项目:国家电网公司科学技术项目(52170217000Q)
通信作者:蒋建东(1974—),男,河南南阳人,郑州大学教授,博士,主要从事电力系统电能质量分析相关的教学科研工作, E-mail:jdjiang@zzu.edu.cn.

(2) 平均电流法与最大电流法. 平均电流法与最大电流法都是均方根电流法的改进算法. 平均电流法又称为形状系数法, 是利用平均电流与均方根电流间的比例关系进行计算. 由于用平均电流计算出的损耗偏小, 故引入等效系数 $K = I_{\text{jr}}/I_{\text{av}}$, 其中 I_{av} 为代表日负荷电流的平均值, 得到电能损耗 $\Delta A = K^2 I_{\text{av}}^2 RT$. 最大电流法, 又称为损失因数法, 该方法是利用最大电流与均方根电流间的比例关系计算. 用最大电流法得到的损耗偏大, 故引入损失因数 $F = I_{\text{jr}}^2/I_{\text{max}}^2$ 进行修正, 总电能公式变形为 $\Delta A = I_{\text{max}}^2 FRT$.

(3) 等值电阻法. 等值电阻法是针对低压配电网节点多、分支多、元件多的特点提出的一种简化算法. 该算法将线损分为由变压器铁芯产生的不变损耗和变压器绕组及线路电阻随电流变化产生的可变损耗两类. 为进一步简化, 通过导线和公用配变等值电阻来对可变损耗部分进行计算.

导线的等值电阻表示为:

$$R_{\text{eqL}} = \sum_{i=1}^m (S_i^2 \cdot R_i) / (\sum S_a)^2, \quad (1)$$

式中: $\sum S_a$ 是该线路各节点配变总容量; S_i 是经过第 i 段导线供电的配变总容量; R_i 为第 i 段导线电阻.

配变绕组的等值电阻表示为:

$$R_{\text{eqT}} = U_N^2 \sum_{j=1}^n P_{k(j)} / (\sum S_a)^2, \quad (2)$$

式中: $P_{k(j)}$ 为第 j 节点公变的短路损耗值; U_N 为配电网额定电压.

综上, 可得到代表日的总损耗:

$$\Delta A = [\sum P_{0(j)} + 3K^2 I_{\text{av}}^2 (R_{\text{eqL}} + R_{\text{eqT}}) \times 10^3] \times 24. \quad (3)$$

在传统的配电网理论线损计算方法中, 由于计算过程粗略, 计算结果存在较大误差. 此外, 传统算法注重对配电网整体损耗的简化分析, 对线路中电容器、电抗器、测量装置的损耗均有考虑, 涉及范围较广但缺乏对重点损耗元件的深入分析.

$$R_h = \frac{2.7 \times 10^{-11} \times \left[R + \left(\frac{0.006}{\sqrt{h}} - r_0 \right) e^{\frac{(r_0 - R)\sqrt{h}}{0.006}} - \frac{0.006}{\sqrt{h}} \right]}{\sqrt{h} \cdot \left\{ \frac{0.012 R}{\sqrt{h}} + \left[\left(\frac{0.012}{\sqrt{h}} \right)^2 - \frac{0.012 r_0}{\sqrt{h}} \right] e^{\frac{(r_0 - R)\sqrt{h}}{0.012}} - \left(\frac{0.012}{\sqrt{h}} \right)^2 \right\}}. \quad (6)$$

但由该式计算的谐波电阻在 20 次以上的工频谐波环境下才有明显变化, 不适用于线路中常见的 5、7、11、13、17、19 等低频次谐波.

2 考虑谐波因素的配电网损耗模型

配电网中由线路和变压器引起的损耗, 占总损耗的 90% 多^[6]. 谐波情况下, 由于集肤效应和涡流效应, 线路电阻以及变压器绕组增大, 引起的附加电能损耗相当可观. 因此, 笔者主要对线路和变压器的谐波损耗进行探讨.

2.1 谐波背景下线路损耗计算模型

线路的损耗与线路电阻和流过线路的电流有关. 理想情况下, 线路电阻为一定值, 可由 $I^2 R$ 直接求取. 谐波背景下线路损耗的计算, 则必须将各次谐波电流 I_h 和谐波电阻 R_h 考虑在内. 故由叠加原理可知, 考虑谐波影响的线路损耗可表示为:

$$P_{\text{Line}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + \cdots + I_h^2 R_h = \sum_{h=1}^{h_{\text{max}}} I_h^2 R_h. \quad (4)$$

谐波电流 I_h 可由电流表测量值经傅里叶展开得到. 谐波电阻 R_h 是频率 f 的函数, 主要受集肤效应和邻近效应影响, 计算相对复杂.

Morgan 经过大量的对比试验, 忽略钢芯导电性给出了钢芯铝绞线的近似模型. 不同频率下相对电阻增量定义如下^[7]:

$$\Delta R/R = Y(1 - \phi)^{-1/2} - 1, \quad (5)$$

其中, $Y = 1 + a(z)[1 - \beta/2 - \beta^2 b(z)]$,

$$a(z) = \frac{7z^2}{315 + 3z^2}, b(z) = \frac{56}{211 + z^2};$$

$$\phi = \lambda \left(\frac{d}{s} \right) 2 \left[\frac{z^2 (2 - \beta)^2}{z^2 (2 - \beta)^2 + 16\beta^2} \right],$$

$$\lambda = 1 - \beta \left(1 + \frac{z^2}{4} \right)^{-1/4} + \frac{10\beta^2}{20 + z^2},$$

$\beta = 2t/d, z = 8\pi^2 t^2 f \gamma; \gamma = 10^{-9}/\pi t R(d - t)$, t 为铝层厚度, d 为钢芯铝绞线直径, R 为单位长度的直流电阻值. 该方法计算较为精确, 但由于所需参数多, 计算过程复杂, 不适用于工程中的近似计算.

文献[8]以架空钢芯铝绞线为对象, 通过对电流密度积分求出电流和焦耳热功率. 考虑在低压线路导线以阻性为主, 热功率近似等于电阻功率, 消去中间变量电流, 得到不同频率下谐波电阻公式:

日本学者通过对导线的交直流电阻测试, 引入交直流电阻系数 $k = R_{\text{AC}}/R_{\text{DC}}$ 来表征不同频率下交直流电阻比^[9], 该方法不但考虑了导线的集

肤效应,而且考虑了钢芯的磁滞和涡流导致的铁损.其中集肤效应系数 k_1 计算公式如下:

$$k_1 = 0.996\,09 + 0.018\,578\,x - 0.030\,263\,x^2 + 0.020\,735\,x^3. \quad (7)$$

其中单一绞合线(铝合金线、铝合金芯铝绞线)和复合绞合线(铝线+钢线)情况下, x 分别按式(8)和(9)取值.

$$x = 0.01 \sqrt{8\pi f / R_{DC}}; \quad (8)$$

$$x = 0.01 \frac{(D_1 + 2D_2)}{(D_1 + D_2)} \sqrt{\frac{8\pi f (D_1 - D_2)}{(D_1 + D_2) R_{DC}}}, \quad (9)$$

式中: f 为频率,Hz; D_1 为绞线的外径,mm; D_2 为钢线的外径,mm.

对单一绞线及复合绞线(铝线层数为偶数),铁损效应系数 $k_2 = 1$,复合绞线(铝线层数为1以上奇数)时:

$$k_2 = 0.999\,47 + 0.028\,859\,y - 0.005\,934\,8y^2 + 0.000\,422\,59y^3, \quad (10)$$

式中: $y = I/A$, I 为绞线电流,A, A 为铝线截面积,mm².

通过上式得出的 k_1 、 k_2 的值小于1时,取 $k_1 = 1$, $k_2 = 1$. $k_1 k_2$ 即为求得的导线交直流电阻比.该法考虑因素全面且计算相对简单,更适合谐波背景下的交流电阻计算.

2.2 谐波背景下变压器损耗计算模型

变压器损耗包含空载和负载损耗.空载损耗又称铁耗,主要包括磁滞和涡流损耗,与负载无关;负载损耗又称铜损,由绕组的直流损耗、绕组涡流损耗和杂散损耗构成.系统含有谐波时,铁耗会受谐波电压的影响,铜耗受谐波电流的影响.

(1) 空载损耗的分析与计算.磁滞损耗是由铁磁材料的磁滞现象产生,与最大磁密 B_m 的平方成正比.由于磁化过程需要交变的磁场,所以其大小还受频率 f 影响^[10].总的来说磁滞损耗 P_H 可表示为:

$$P_H = C_1 B_m^2 \cdot f \cdot V, \quad (11)$$

式中: C_1 由硅钢片材料性质决定,为常数; V 表示铁磁材料体积.当含有多次谐波时,谐波电压含量越高,磁滞损耗则越大,可表示为:

$$P_H = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_h = \left(\sum_{h=1}^M \frac{U_h}{hU_1} \cos \varphi_h \right)^S. \quad (12)$$

式中: P_h 为第 h 次谐波的磁滞损耗; U_h 为第 h 次谐波电压; U_1 为基波电压; φ_h 为 h 次谐波电压初相角.

谐波背景下的涡流损耗也将随谐波电压含量

的增大而增大,其计算式为:

$$P_w = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_h = 1 + \left(\sum_{h=1}^M \frac{U_h}{U_1} \right)^2 C_{eh}, \quad (13)$$

C_{eh} 由电磁波的透入深度决定, C_{eh} 的表达式如下:

$$C_{eh} = \begin{cases} 1 - 0.001\,7\xi^{3.61}, & \xi < 3.6; \\ \frac{3}{\xi}, & \xi > 3.6, \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\xi = c \sqrt{\prod u \gamma h f}$. (15)

式中: P_w 为涡流损耗; U_h 为第 h 次谐波电压; U_1 为基波电压; c 为铁芯厚度; u 为铁芯渗透性; γ 为铁芯电导率; f 为基波频率.

综上可知,变压器空载附加损耗主要取决于电压.由于无功补偿与滤波装置的大量投入,通常情况下系统谐波电压 THD 不超过 5%;并且各谐波分量幅值很小,一般在基波幅值的 2%~3%以下^[11-12],因此,这部分损耗可忽略.

(2) 负载损耗的分析与计算.变压器的负载损耗 P_{LL} 包括电阻损耗 $P(I^2 R)$ 和总杂散损耗 P_{TSL} .尽管总杂散损耗实质上都是由漏磁引起的涡流损耗,又可根据其分布位置不同,分为在绕组线圈内引起的绕组涡流损耗 P_{EC} 和在铁芯、夹件、油箱等部位导致的其他杂散损耗 P_{OSL} ,故变压器负载损耗表示为:

$$P_{LL} = P + P_{TSL} = P + P_{EC} + P_{OSL}. \quad (16)$$

目前变压器绕组采用的交流电阻模型多为 $R_h = \sqrt{h}R$,简单的将交流电阻这样等效,忽略了集肤效应与邻近效应的影响,在线路存在高次谐波时,存在较大误差^[13-14].IEEE Std C57.110 通过引入谐波损耗因子,给出了谐波情况下根据测试数据计算负载损耗的方法^[15]:

$$P_{LL} = P_0 + F_{HL-EC} P_{EC-0} + F_{HL-OSL} P_{OSL-0}, \quad (17)$$

其中, F_{HL-EC} , F_{HL-OSL} 为绕组涡流谐波因子与其他杂散损耗谐波因子,定义式如下:

$$F_{HL-EC} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2}; \quad (18)$$

$$F_{HL-OSL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^{0.8}} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^{0.8}}, \quad (19)$$

式中: h 为谐波阶次; I_1 为基波电流; I_h 为第 h 次谐波电流.

P_0, P_{EC-0}, P_{OSL-0} 为工频实测电流的各部分损耗,需通过额定损耗值乘以修正因子 $\left(\frac{I}{I_R}\right)^2$ 求得.由于工程中谐波分析装置所测结果多为各次谐波含有率(各次谐波电流与基波电流之比),故作如下转换:

$$\left(\frac{I}{I_R}\right)^2 = \left(\frac{I_1}{I_R} \cdot \frac{I}{I_1}\right)^2 = \left(\frac{I_1}{I_R}\right)^2 \cdot \sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \quad (20)$$

当以额定正弦电压供电时,变压器总负载损耗的表达式如下:

$$P_{LL-R} = P_R + P_{EC-R} + P_{OSL-R}, \quad (21)$$

式中: P_{LL-R} 为额定负载损耗(即短路实验损耗); P_R 为额定电阻损耗,可由式(21)求得:

$$P_R = K \cdot (I_{1-R}^2 R_1 + I_{2-R}^2 R_2), \quad (22)$$

式中: K 根据变压器相数选取,单相取 1,三相取 1.5. 原副边的直流电阻可由实验测试报告获取.

额定涡流损耗 P_{EC-R} 与额定其他杂散损耗 P_{OSL-R} 占总杂散损耗的比例基本固定,标准根据大量测试报告给出了二者的比例系数.对于油浸式变压器二者占总杂散损耗的比例分别为 33% 和 67%,干式变压器刚好相反.综上分析,谐波背景下变压器总损耗可表示为:

$$P_T = P_{NL} + (P_R + F_{HL-EC} P_{EC-R} + F_{HL-OSL} P_{OSL-R}) \cdot (I/I_R)^2. \quad (23)$$

3 考虑谐波因素的损耗量化分析

根据上文给出的线路与变压器的谐波线损模型,分别选取交流电阻系数法及谐波损耗因子法来计算线路谐波损耗及变压器的谐波铜耗.在考虑谐波因素的配电网损耗计算中,谐波电流起主导作用,故通过实例量化分析不同电流谐波含有率,不同谐波次数对线路以及变压器损耗的影响机理.其中线路采用标称截面积为 120 mm^2 的 JL-HA2 铝合金绞线,直流电阻 $R_{DC} = 0.2877\text{ }\Omega/\text{km}$,电抗 $X = 0.335\text{ }\Omega/\text{km}$,线路长度 20 km .选用 S11-50/10 型变压器,连接组标号为 Dyn11.线路 5、7、11、13、17、19 次谐波电阻分别为 5.894、6.024、6.386、6.612、7.144、7.446.变压器参数如表 1 所示.

在谐波电流含有率为 1%、5%、7%、11%、13%、17%、19% 的情况下,分别对 5、7、11、13、17、19 次谐波损耗进行计算,其中线路基波电流值选择变压器一次侧额定电流,变压器所用基波电流选用二次侧额定电流.根据计算结果,拟合出“损耗-谐波电流含有率”和“损耗-谐波次数”曲线,如图 1~2 所示.同时,考虑谐波与不考虑谐

表 1 变压器参数

Tab.1 Parameters of transformer	
变压器参数	取值
额定容量/kVA	50
额定电压/V	10 000/400
空载损耗/W	130
短路损耗/W	910
额定电流/A	2.89/72.17
空载电流/%	1.3
阻抗电压/%	4.0

波时,对线路及变压器的损耗进行对比,如图 3 所示.

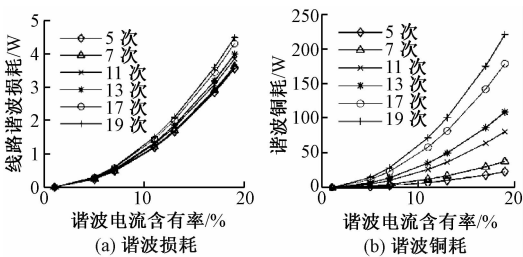


图 1 5~19 次谐波损耗随谐波电流含有率变化
Fig.1 Variation of 5~19 harmonic loss with harmonic current ratio

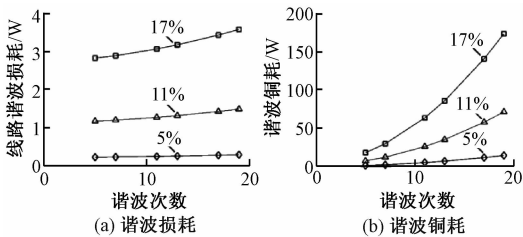


图 2 不同谐波电流含有率谐波损耗随谐波次数变化曲线
Fig.2 Variation of harmonic loss with harmonic order under different harmonic current ratio

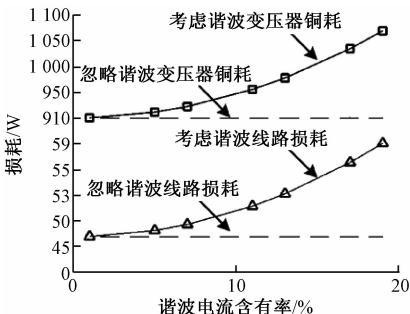


图 3 考虑或忽略谐波情况下损耗变化情况
Fig.3 Variation of loss under considering or ignoring harmonic factor

由上述分析知:考虑谐波因素后,变压器及线路损耗均有不同程度增加,当谐波电流含量达到 19% 时,线路和变压器损耗分别增加约 23.2% 和 18.7%.谐波次数一定时,线路谐波损耗与谐波电

流含有率的平方成正比,变压器较高次谐波与谐波电流含有率的平方近似成正比. 谐波含有率一定,线路与变压器谐波损耗均随谐波次数增大而增大. 线路谐波损耗主要受交流电阻系数影响,变化平缓;变压器谐波损耗主要受谐波损耗因子影响,变化较快.

4 仿真验证

4.1 仿真建模

为了验证上文量化分析结果,首先在 Matlab/simulink 中,对系统中含量较高的 5、7、13 次谐波在不同谐波含有率下进行单独仿真,并分析其与计算结果的误差. 首先采用三相可编程电压源,模拟不同谐波次数、不同谐波含量的注入,所选输电线路与变压器型号与上文量化计算一致,换算后仿真参数设置如下:线路电阻 5.76 Ω、电感

0.021 4 H;变压器一次电阻 18.2 Ω、二次电阻 0.029 Ω、一次电感 0.127 H、二次电感 0.204 mH、激磁电阻 769 230 Ω、激磁电感 0.127 H.

模拟实际系统中多次谐波共同存在的情况,对总体配网损耗仿真. 由于三相可编程电源产生谐波的数量有限,改用负荷侧并联整流装置,向系统注入谐波,仿真模型如图 4 所示. 其中,黑色矩形模块为三相电压电流测量装置,通过改变两个电能表的接入位置来完成对线路及变压器谐波功率损耗的单独或混合测量. 整流元件由同步六脉冲发生器触发,电能表由三相瞬时功率测量元件和积分环节构成. 选用连续型仿真模型 ode23tb 求解算法,仿真时间设置为 0.4 s. 整流部分负载电阻 $R=13\ \Omega$,滤波电感 $L=1\ \text{mH}$,电容 $C=3\ 300\ \mu\text{F}$,有功负荷 $P=20\ \text{kW}$,感性无功 $QL=4\ \text{kW}\cdot\text{h}$,其他参数与上文单独仿真一致.

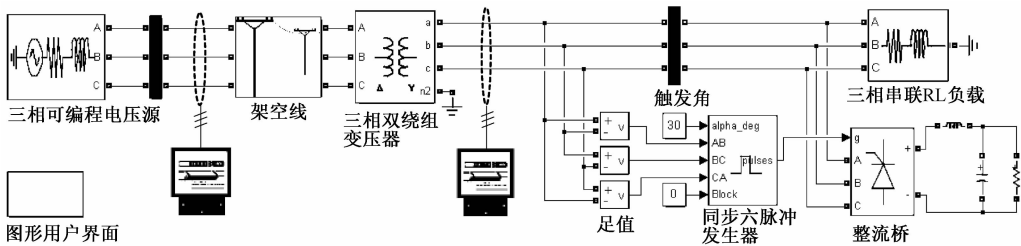


图 4 线损仿真模型
Fig. 4 Simulation model of line loss

4.2 实例分析

(1) 单次谐波影响. 仿真结果及不同含有率仿真与计算误差值如图 5~6 所示.

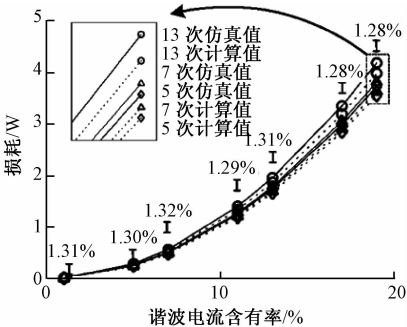


图 5 线路谐波损耗仿真与计算结果对比
Fig. 5 Comparison of simulation and calculation results of harmonic line loss

由图可知,总体来看,线路及变压器仿真结果与量化计算结果较为接近,且仿真值略大于计算值. 由于线路模型与实际情况相比仍然存在一些差异,线路计算结果与仿真值始终存在误差,但误差变化不大,基本稳定在 1.3% 附近,满足工程计算要求. 变压器计算误差随谐波含量的增加有所

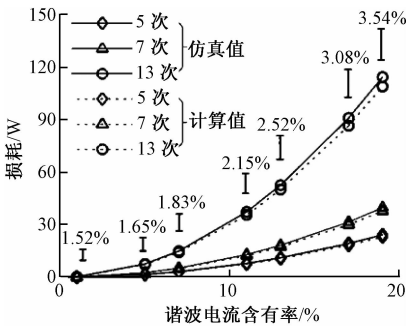


图 6 谐波铜耗仿真与计算结果对比
Fig. 6 Comparison of simulation and calculation results of harmonic copper loss

增大,但总体不超过 4%. 究其原因为笔者所采用的计算模型忽略了附加铁耗的影响,而仿真过程中,表计测量的损耗包含谐波引起的附加铁耗. 由前文分析知,铁耗会随谐波电压含有率的增大而增大. 实际中,谐波电压一般满足国标要求,可忽略这部分损耗.

(2) 混合谐波影响. 仿真过程中,测得变压器一二次侧电流有效值分别为 2.42 A 和 60.52 A,线路出口处电表有功电量为 16 730 W,两表抄见

电量之差为 540 W. 根据变压器一二次侧电压电流测量结果,使用 FFT 分析工具,进行谐波分析. 分析得到,系统谐波以 5、7、11、13、17、19 次为主;一次电压总谐波畸变率为 0.08% 左右,负荷侧为 4.64% 左右,均在 5% 以下,满足所在电压等级国标限制. 各次谐波电流含有率如表 2 所示.

表 2 谐波电流含有率
Tab. 2 Harmonic current ratio

h	一次 $HRI/\%$	二次 $HRI/\%$
5	25.26	25.90
7	12.10	12.41
11	3.17	3.25
13	3.45	3.54
17	0.85	0.87
19	1.53	1.57

注: HRI 为谐波电流含有率.

为了与传统线损计算方法对比,根据上述测量数据,同时用等值电阻法计算. 由于仿真线路简单,仿真过程处于稳态,式(3)中平均电流 I_{av} 近似取为基波电流有效值. 根据式(18)计算变压器谐波损耗因子等参数,结果如表 3 所示. 利用以上数据及表 1 相关参数,根据式(7)、(10)、(22)进行线路及变压器的损耗计算,得到电能损耗与线损率计算结果如表 4 所示. 由结果可知:传统等值电阻法,忽略了谐波因素,计算结果误差较大;笔者给出的考虑谐波因素的理论线损计算方法,与仿真结果更为接近.

表 3 变压器相关参数值
Tab. 3 Transformer related value

参数	取值
R_{eqL}/Ω	5.75
R_{eqT}/Ω	36.40
K^2	1.00
F_{HL-EC}	3.58
F_{HL-OSL}	1.23
$(I/I_R)^2$	0.76

表 4 线损计算结果
Tab. 4 Calculation results of line loss

计算方法	电能损耗/W	线损率/%
测量值	540.0	3.23
等值电阻法	348.4	2.08
本文方法	513.7	3.07

5 结论

(1)笔者提出的考虑谐波因素的配电网理论线损计算方法,能充分反映谐波对线路、变压器带

来的附加损耗. 虽然求解过程复杂程度有所增加,但与传统等值电阻法相比,提高了计算结果的精确度,对降损工作更具指导意义.

(2)笔者只单一考虑了电能质量问题中的谐波问题. 配电网三相负荷不平衡,电压偏差以及复合电能质量因素作用下给系统带来的附加损耗,仍需要进一步研究. 此外如果加入实际线路测量结果,与仿真以及计算结果三者对比分析,将进一步验证该方法的有效性.

(3)计算结果表明变压器铜耗与输电线路损耗均随谐波电流含量及谐波次数的增大而增大,且铜耗占据的比重远大于线路损耗和变压器铁耗,因此限制变压器谐波电流的大小和次数对于减小总线损具有重要意义.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵国生,詹天乐,李博. 计及线路损耗的峰谷分时电价优化模型[J]. 郑州大学学报(工学版),2017,38(6):45-49.
- [3] 徐长宝,李怀宇,冯成,等. 电力系统三相不平衡附加损耗的分配[J]. 水电能源科学,2016,34(8):189-193.
- [4] 李滨,杜孟远,韦维,等. 基于准实时数据的智能配电网理论线损计算[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):122-128.
- [5] 赵磊,栾文鹏,王倩. 应用 AMI 数据的低压配电网精确线损分析[J]. 电网技术,2015,39(11):3189-3194.
- [6] 李博. 低压配电网谐波对网损的影响及对策研究[D]. 淄博:山东理工大学电气与电子工程学院,2015.
- [7] MORGAN V T, FINDLAY R D, DERRAH S. New formula to calculate the skin effect in isolated tubular conductors at low frequencies[J]. IEE proceedings-science, measurement technology, 2000, 147(4): 169-171.
- [8] JIANG L M, YAN H G, MENG J X, et al. Harmonic loss quantitative model of transmission line considering the skineffect[C] //2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). Shanghai:IEEE Press,2016: 19-23.
- [9] 张瑞永,赵新宇,陶礼学. 架空导线的交流电阻计算方法对比[J]. 电线电缆,2014,4(4):1-4.

Multi-level Image Segmentation Based on an Improved Particle Swarm Optimization with an Equilibrium Strategy

XIA Xingyu¹, GAO Hao¹, WANG Chuangye²

(1. College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China; 2. State Grid Guzhen Electric Power Company, Bengbu, 230000, China)

Abstract: The computation time of some multi-level threshold segmentation techniques needs were too long to bear, and it grew exponentially with the number of thresholds increased. This paper proposed a particle swarm optimization with an equilibrium strategy for shorting its computation time. First, during iterations, a balance operator for individuals to have more chances to search in the global area was introduced. Furthermore, for enhancing the local search ability of our proposed algorithm, a disturbance operator was also been introduced in this paper which enabled the individual had more opportunities to make a precise search. The improved algorithm enables particles had more chances to jump out of a local area for enhancing their global search ability. Meanwhile, a valuable point to guide the search direction of the particles was introduced. Then it accelerated the convergence rate of the improved algorithm. Kapur method was used in this paper to test the performance of the proposed method. Experimental results showed that our proposed algorithm showed more power and fast search ability when compared with the other population-based algorithms.

Key words: multi-level threshold; particle swarm optimization; search ability; kapur method

(上接第 58 页)

[10] 张占龙,王科,李德文,等. 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 – 72, 78.

[11] 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.

[12] SADATISB, TAHANIA, DARVISHIB, et al. Comparison of Distribution Transformer Losses and Capacity under Linear and Harmonic Loads[C] // 2nd IEEE international conference on power and energy. Johor Baharu, Malaysia: IEEE, 2008, 1265 – 1269.

[13] 李琼林,邹磊,刘会金,等. 电力变压器谐波损耗仿真计算与实验研究[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3521 – 3527.

[14] 夏焰坤. 电气化铁路单三相组合式变压器电气特性分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(4): 11 – 14, 35.

[15] IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents: IEEE Std C57.110—2008[S].

Quantification Calculation and Modeling Simulation of Distribution Network Losses Considering Harmonic Factor

WEI Chaofeng^{1,2}, LI Qionglin², JIANG Jiandong¹, TANG Yuzheng², WANG Chun¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Accurate line loss calculation was the basis of realizing economic operation of power grid. The harmonic pollution in distribution network was becoming increasingly serious. Because of harmonic factors, the distribution network operation state and equipment parameters have changed greatly, and the additional losses caused should not be neglected. Based on the analysis of the traditional calculation method of line loss, this paper systematically analyzed the mechanism of harmonic effect on distribution transformer and power line. By introducing the transmission line AC resistance coefficient and transformer harmonic loss factors, a loss calculation model considering harmonic was put forward. Then, combined with the typical distribution transformer and transmission line, the harmonic loss was calculated quantitatively. Finally, the validity and accuracy of the model were verified by modeling and simulation.

Key words: harmonic; line loss; AC resistance coefficient; harmonic loss factor; modeling and simulation