

计及电能质量影响的10 kV配电网损耗计算模型及其实验验证

李琼林¹,刘书铭¹,温佳静²,王毅¹,代双寅¹,谭甜源²,刘开培²

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院,河南 郑州 450000;2. 武汉大学 电气与自动化学院,湖北 武汉 430072)

摘要:随着智能电网的不断发展,电能质量扰动日益增加,探索计及电能质量因素的配电网损耗计算模型对电力系统节能降耗有十分重要的意义。分别给出了在谐波、三相电流不平衡、电压偏差这3种常见的电能质量扰动影响下的10 kV配电网的损耗计算模型;然后提出了同时考虑多种电能质量扰动的10 kV配电网损耗评估方法并建立了计算模型,提高了10 kV配电网损耗理论计算的准确度。配电网损耗综合评估分为固定损耗评估和可变损耗评估2个部分,固定损耗评估主要考虑电压偏差对变压器固定损耗的影响,可变损耗评估对以上3种电能质量扰动进行解耦评估,然后综合估算出10 kV配电网的可变损耗的综合附加损耗率。最后通过实验验证了所提计算方法及对应模型的正确性。

关键词:电能质量;10 kV配电网损耗;谐波;三相电流不平衡;电压偏差

中图分类号:TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202108035

0 引言

传统的配电网损耗计算是在理想的供电环境下进行的,当配电网存在电能质量扰动时会产生较大的计算误差,且电能质量扰动越严重误差越大。近年来,各种新型用电设备、轨道交通、分布式电源等干扰源负荷持续增长,其非线性、冲击性和不平衡在电力生产和用电过程中会对配电网产生严重污染,如波形畸变、三相电压不平衡、电压波动和闪变等,使得配电网电能质量日益恶化,进一步增加配电网损耗^[1-4]。因此,在进行10 kV配电网线损计算时如何计及电能质量因素,提高10 kV配电网损耗计算的准确性与合理性,对于电力行业进一步的节能降耗具有十分重要的意义。

目前国内外的研究大部分仅分析了单一电能质量扰动对低压配电网损耗的影响,主要集中在谐波和三相电流不平衡的分析及相应的治理措施方面。文献[5-6]以 $\sqrt{h}R$ (h 为谐波次数, R 为直流电阻)等效 h 次谐波电阻,此种简化模型能够体现谐波附加损耗随谐波次数的变化趋势,但该模型未考虑线路材料等因素对谐波电阻的影响,针对不同型号的线路计算误差较大,难以满足谐波附加损耗计算精度。文献[7]提出了一种考虑集肤效应影响的低压配电网线路谐波电阻参数辨识算法,并采用实测运行数据完成谐波电阻参数辨识,得到了线路谐波电阻模型,但该方法依托于实测数据,计算量大,且没有给出谐

波电阻与谐波次数之间的量化关系公式。文献[8]参考IEEE Std C57.110标准^[9]中变压器绕组涡流谐波损耗因子和杂散谐波损耗因子的计算方法得出绕组电阻谐波损耗因子的计算公式,并利用以上3个因子计算变压器负载谐波损耗,该方法模型较为简单,易于实现。文献[10]以A、B、C相的电流幅值不平衡度作为指标,计算配电变压器(下文称配变)和线路的三相电流不平衡系数,从而推导出低压配电网中的三相电流不平衡附加损耗,但是该方法没有考虑相角不平衡,不够精确。文献[11]对变压器中绕组的电磁场进行了分析,利用坡印亭矢量法得出各层绕组的损耗计算公式,由此分析了集肤效应与邻近效应对绕组的影响,建立了变压器谐波附加损耗模型。但该模型中涉及的变压器内部参数较多,公式较为复杂,且计算附加损耗时绕组支路的计算是在频域中进行的,而励磁支路是在时域中完成的,需要多次迭代计算。文献[12]对一种计及电压偏差和负载波动情况的配变损耗精确计算模型进行了分析,并用实验验证了所建模型可以提高线损计算的准确性,但该方法需要利用的各损耗系数的求取比较困难,损耗系数的计算与负荷曲线以及网络结构紧密相关,计算结果没有通用性。文献[13]提出了一种利用不平衡系数、负荷分布系数和单位电压损耗系数的电压损耗综合估算模型,但该模型没有解耦三相电流不平衡和电压偏差带来的附加损耗。文献[14]通过仿真验证了复合电能质量扰动下的低压配电网附加损耗并不等于各单一电能质量扰动单独存在时产生的附加损耗的简单叠加,然后提出了一种复合电能质量扰动的解耦方法,可以将附加损耗解耦成三相电流不平衡附加损耗与谐波附加损耗之和。

收稿日期:2020-12-09;修回日期:2021-07-01

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5400-201921142A-0-0-00)

Project supported by the Science and Technology Project of Headquarter of State Grid Corporation of China (5400-201921142A-0-0-00)

以上研究为本文研究的计及电能质量影响的 10 kV 配电网损耗计算模型提供了经验,但是实际的配电网可能同时包含多种电能质量扰动,而针对多种电能质量扰动下配电网损耗的系统量化评估还尚未开展。因此本文在分别分析单种电能质量扰动对配电网损耗影响的基础上,建立了同时考虑多种电能质量扰动影响的 10 kV 配电网损耗评估方法与计算模型。

1 计及单种电能质量扰动影响的配电网损耗计算

由于实际的 10 kV 线路分支多,求解所有单一元件的损耗再相加显然是不现实的,本文重点研究计及单种电能质量扰动影响的 10 kV 配电网损耗计算模型,其中产生损耗的主要元件是配变和线路。在配电网中,线路损耗都是可变损耗,而配变损耗包括配变固定损耗(铁损)和配变可变损耗(铜损)两部分。

1.1 计及谐波的 10 kV 配电网损耗计算

一般而言,电网谐波电压畸变率不大,其对变压器的固定损耗影响相对较小,可以忽略不计,因此通常只需要计及谐波电流对配电网可变损耗(线路的损耗和配变的负载损耗)的影响。由于间谐波和谐波本质上相同,谐波附加损耗分析同样适用于间谐波。

10 kV 系统中三相的谐波电流幅值和畸变率可能不同,此时需要分相计算各相谐波电流的损耗,当每台配变的谐波电流都得到监测时,可分段计算得到每段馈线的谐波附加损耗,最后累加得到总的谐波附加损耗,如式(1)所示。

$$\Delta P_h = \sum_{i=1}^L \sum_{h>1} (I_{R,ihA}^2 + I_{R,ihB}^2 + I_{R,ihC}^2) R_{ih} + \sum_{i=1}^M \sum_{h>1} (I_{T,ihA}^2 + I_{T,ihB}^2 + I_{T,ihC}^2) R_{Tih} \quad (1)$$

式中: ΔP_h 为 10 kV 配电网总谐波附加损耗; R_{ih} 、 R_{Tih} 分别为第 i 段线路和第 i 台配变的等值谐波电阻; L 为该 10 kV 馈线计算过程的线路分段数; M 为该 10 kV 馈线所包含的配变总台数; $I_{R,ihA}$ 、 $I_{R,ihB}$ 、 $I_{R,ihC}$ 分别为第 i 段线路的 A、B、C 相的 h 次谐波电流的有效值; $I_{T,ihA}$ 、 $I_{T,ihB}$ 、 $I_{T,ihC}$ 分别为第 i 台配变的 A、B、C 相的 h 次谐波电流的有效值。

谐波电阻的阻值受集肤效应和邻近效应影响,与系统频率 f 有关。根据 IEC60287 标准,考虑磁滞、涡流和集肤效应后,导体的 h 次谐波交流电阻为:

$$R_h = R(1 + y_{sh} + y_{ph}) = R k_h \quad (2)$$

$$R = \frac{\rho_{20}}{A} [1 + t(\theta - 20)] \quad (3)$$

$$y_{sh} = \frac{X_{sh}^4}{192 + 0.8X_{sh}^4} \quad (4)$$

$$y_{ph} = \frac{X_{ph}^4}{192 + 0.8X_{ph}^4} \left(\frac{D_c}{s} \right)^2 \times \left[0.312 \left(\frac{D_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{X_{ph}^4}{192 + 0.8X_{ph}^4} + 0.27} \right] \quad (5)$$

$$X_{sh}^2 = \frac{8\pi f_h \times 10^{-7}}{R} k_s \quad (6)$$

$$X_{ph}^2 = \frac{8\pi f_h \times 10^{-7}}{R} k_p \quad (7)$$

式中: R_h 为导体的 h 次谐波交流电阻(Ω/m); y_{sh} 、 y_{ph} 分别为 h 次谐波作用下的集肤效应系数、邻近效应系数,本文将 $k_h = 1 + y_{sh} + y_{ph}$ 定义为谐波系数; ρ_{20} 为导线材料在 20 °C 下的电阻率($\Omega \cdot \text{mm}^2/m$); A 为导线的横截面积(mm^2); t 为电阻温度系数; θ 为导线的最高使用温度(°C); f_h 为 h 次谐波频率; D_c 为导线外径(mm); s 为导线中心轴之间的距离(mm); k_s 、 k_p 的取值如附录 A 表 A1 所示。

则单条线路的谐波可变损耗的附加损耗率(下文简称谐波可变附加损耗率) α 如式(8)所示。

$$\alpha = \frac{\sum_{h>1} (I_{R,hA}^2 + I_{R,hB}^2 + I_{R,hC}^2) R_h}{3I_1^2 R} = \sum_{h>1} H_h k_h \quad (8)$$

式中: $I_{R,hA}$ 、 $I_{R,hB}$ 、 $I_{R,hC}$ 分别为线路的 A、B、C 相的 h 次谐波电流; I_1 为线路基波电流; H_h 为 h 次谐波电流含有率。

配变绕组在谐波作用下的负载损耗主要由三部分组成,即谐波电流对电阻损耗的影响($\propto \sqrt{h}$),谐波电流对绕组涡流损耗的影响($\propto h^2$),谐波电流对其他杂散损耗($\propto h^{0.8}$)的影响。因此,在计及集肤效应和邻近效应对绕组电阻的影响后, h 次谐波电流作用下的配变等值交流电阻 R_{Th} 将增大为 $k_{Th} R_{T1}$ ($k_{Th} \in [\sqrt{h}, h^2]$, R_{T1} 为配变基波交流等值电阻),具体根据谐波损耗各个成分的占比来确定。则单台配变谐波可变附加损耗率 α' 如式(9)所示。

$$\alpha' = \frac{\sum_{h>1} (I_{T,hA}^2 + I_{T,hB}^2 + I_{T,hC}^2) R_{Th}}{3I_1^2 R_{T1}} = \sum_{h>1} H_h k_{Th} \quad (9)$$

k_h 和 k_{Th} 的值仅与谐波次数有关,且一一对应,不随时间及电网运行状态变化,因此在工程应用中只需要测量配电网的各次谐波电流含有率 H_h 即可得到 α 和 α' ,从而计算出谐波附加损耗和总损耗。

1.2 计及三相电流不平衡的 10 kV 配电网损耗计算

配变固定损耗只受电压影响,在三相电流不平衡时几乎不变,因此对于配变本文只讨论三相电流不平衡影响下其可变损耗的变化。为了避免在计算电能质量扰动引起的附加损耗率时的重复计算问题,在分析三相电流不平衡带来的可变损耗的附加损耗率(下文简称三相电流不平衡可变附加损耗率)

时,只考虑基波电流而不考虑谐波电流的影响。因此本文采用电流的基波负序分量 I_{12} 与基波正序分量 I_{11} 的比值来表示三相电流不平衡度 β ,即:

$$\beta = \frac{I_{12}}{I_{11}} \quad (10)$$

在不考虑电流畸变的情况下,采用对称分量法计算三相电流不平衡带来的损耗。

对于三相三线制线路,当三相负载电流不平衡时,线路损耗 ΔP_{umb} 如式(11)所示。

$$\Delta P_{\text{umb}} = (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)R_{\text{eq}} = 3(I_{11}^2 + I_{12}^2)R_{\text{eq}} \quad (11)$$

式中: I_A 、 I_B 、 I_C 分别为A、B、C相负载电流; R_{eq} 为端线(火线)等效电阻。

如果通过调整负载或投入治理装置,完全抑制三相电流不平衡负载电流中的负序电流,则电网只需传输三相平衡的正序电流,线路损耗达到最小值 ΔP_b ,如式(12)所示。

$$\Delta P_b = 3I_{11}^2 R_{\text{eq}} \quad (12)$$

根据上述分析易知,三相三线制线路的三相电流不平衡可变附加损耗率 γ 为:

$$\gamma = \frac{\Delta P_{\text{umb}} - \Delta P_b}{\Delta P_b} = \beta^2 \quad (13)$$

当三相四线制配电网三相电流不平衡时,不仅会和三相三线制线路一样在相线上引起损耗,中性线上还会流过零序电流 I_0 从而产生额外的损耗,则此时三相四线制线路的损耗 $\Delta P'_{\text{umb}}$ 为:

$$\Delta P'_{\text{umb}} = (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)R_{\text{eq}} + I_N^2 R_N = 3(I_{11}^2 + I_{12}^2 + I_{10}^2)R_{\text{eq}} + 9I_0^2 R_N \quad (14)$$

式中: I_{10} 为基波零序电流分量,可直接测量得到为 $I_N/3$, I_N 为中性线电流; R_N 为中性线等效电阻。

因此三相四线制线路的三相电流不平衡可变附加损耗率 γ' 为:

$$\gamma' = \frac{\Delta P'_{\text{umb}} - \Delta P_b}{\Delta P_b} = \frac{(I_{10}^2 + I_{12}^2)}{I_{11}^2} + \frac{I_{10}^2}{I_{11}^2} \frac{3R_N}{R_{\text{eq}}} = \beta^2 + \beta_0^2 \left(1 + \frac{3R_N}{R_{\text{eq}}}\right) \quad (15)$$

式中: β_0 为零序电流不平衡度。

10 kV 配变采用 Δ/Y 联接,低压侧实际上相当于一段特殊的三相四线制线路,其中性点直接引出,等效于三相四线制线路的中性线上电阻为0。

因此在三相电流不平衡影响下,10 kV 配变的可变损耗 $\Delta P''_{\text{umb}}$ 为:

$$\Delta P''_{\text{umb}} = 3(I_{T11}^2 + I_{T12}^2 + I_{T10}^2)R_T \quad (16)$$

式中: I_{T11} 、 I_{T12} 和 I_{T10} 分别为配变的基波正序、负序和零序电流; R_T 为配变低压侧等效电阻。

配变的三相电流不平衡可变附加损耗率 γ'' 为:

$$\gamma'' = \frac{I_{T12}^2}{I_{T11}^2} + \frac{I_{T10}^2}{I_{T11}^2} = \beta^2 + \beta_0^2 \quad (17)$$

对于配电网中广泛存在的辐射状馈线,则首先需要进行馈线分段,计算出每段馈线的附加损耗后进行累加得到总的附加损耗,如式(18)所示。

$$\Delta P_{\text{umb}\Sigma} = 3 \sum_{i=1}^L (I_{R,i1}^2 + I_{R,i2}^2) R_i + 3 \sum_{i=1}^M (I_{T,i1}^2 + I_{T,i2}^2 + I_{T,i0}^2) R_{Ti} \quad (18)$$

式中: $\Delta P_{\text{umb}\Sigma}$ 为三相电流不平衡导致的10 kV 配电网总损耗; R_i 、 R_{Ti} 分别为第 i 段馈线和第 i 台配变的等值电阻; $I_{R,i1}$ 、 $I_{R,i2}$ 分别为第 i 段馈线的基波正序电流和基波负序电流的有效值; $I_{T,i1}$ 、 $I_{T,i2}$ 、 $I_{T,i0}$ 分别为第 i 台配变的基波正序电流、基波负序电流和基波零序电流的有效值。

工程应用中,只需要测量三相基波电流的不平衡度 β 和零序电流不平衡度 β_0 ,即可得出三相电流不平衡可变附加损耗率,从而计算出三相电流不平衡引起的附加损耗(下文简称三相电流不平衡附加损耗)和总损耗。

1.3 计及电压偏差的10 kV 配电网损耗计算

配变固定损耗指的是产生在配变等值并联电导上的损耗,其与负载电流无关,但是与电网运行电压的平方成正比^[15],即:

$$\Delta P'_0 = \left(\frac{U}{U_N}\right)^2 \Delta P_0 \quad (19)$$

式中: $\Delta P'_0$ 为配变固定损耗; U 为电网运行电压; U_N 为电网的额定电压; ΔP_0 为额定电压下配变的固定损耗。

则对于配变,电压偏差导致的固定损耗附加损耗率(下文简称电压偏差固定附加损耗率) λ_0 如式(20)所示。

$$\lambda_0 = (1 + \Delta U)^2 - 1 = 2\Delta U + (\Delta U)^2 \quad (20)$$

式中: ΔU 为电压偏差率, $\Delta U = (U - U_N)/U_N \times 100\%$ 。

当每台配变的电压都能够通过监测装置得到时,可以采用式(20)准确计算出各配变的电压偏差固定附加损耗率,然后通过加权累加就可以得到配变总的电压偏差固定附加损耗率 $\lambda_{0\Sigma}$ 如式(21)所示。

$$\lambda_{0\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^M \Delta P_{0i} \lambda_{0i}}{\sum_{i=1}^M \Delta P_{0i}} = \frac{\sum_{i=1}^M \Delta P_{0i}}{\sum_{i=1}^M \Delta P_{0i}} \lambda_{0i} \quad (21)$$

式中: λ_{0i} 为第 i 台配变的电压偏差固定附加损耗率; ΔP_{0i} 为第 i 台配变在额定电压下的固定损耗。

配变的可变损耗是指配变电阻上的损耗,其随负荷电流的变化而变化,与负荷电流的平方(或负载功率)成正比,如式(22)所示。

$$\Delta P_1 = 3I^2 R_{\text{eq}} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_{\text{eq}} = \frac{P^2 (1 + \tan^2 \varphi)}{U^2} R_{\text{eq}} \quad (22)$$

式中: P 、 Q 分别为负载的有功功率、无功功率; φ 为功率因数角, $\tan \varphi = Q/P$; I 为负荷电流。

为了定量分析电压偏差给配变可变损耗带来的影响,需要事先确定等值负荷静态电压特性在额定电压值处的斜率,即通过经验或者测量获得等值负荷的有功功率静态电压特性系数 χ 和无功功率静态电压特性系数 δ ,其中^[16]:

$$\begin{cases} \frac{dP}{dU} = \chi \frac{P}{U} \\ \frac{dQ}{dU} = \delta \frac{Q}{U} \end{cases} \quad (23)$$

根据泰勒级数展开,保留 ΔU 的平方项,忽略更高阶的微小分量,可得当系统电压发生偏差后,负载的有功功率 P' 和无功功率 Q' 为:

$$\begin{cases} P' = P(1 + \Delta U)^\chi \approx P \left[1 + \chi \Delta U + \frac{\chi(\chi-1)(\Delta U)^2}{2} \right] \\ Q' = Q(1 + \Delta U)^\delta \approx Q \left[1 + \delta \Delta U + \frac{\delta(\delta-1)(\Delta U)^2}{2} \right] \end{cases} \quad (24)$$

当 $\chi \neq \delta$ 时,系统电压发生偏差后,功率因数角也会略微发生变化,则有:

$$\tan \varphi' = \frac{Q'}{P'} \quad (25)$$

式中: φ' 为系统电压发生偏差后的功率因数角。

则系统电压发生偏差后的配变可变损耗 $\Delta P_1'$ 如式(26)所示。

$$\Delta P_1' = \frac{(P')^2 + (Q')^2}{(U')^2} R_{eq} = \frac{(P')^2 + (Q')^2}{U^2(1 + \Delta U)^2} R_{eq} = \frac{(P')^2(1 + \tan^2 \varphi')}{U^2(1 + \Delta U)^2} R_{eq} \quad (26)$$

系统电压发生偏差后的有功功率 P' 、无功功率 Q' 及功率因数角 φ' 都是可以直接测量的,而系统电压发生偏差前的有功功率 P 和无功功率 Q 可以根据有功功率静态电压特性系数和无功功率静态电压特性系数由式(24)反推出来,然后将其代入式(25)即可得系统电压无偏差时的配变可变损耗如式(27)所示。

$$\Delta P_1 = \frac{\left[\frac{P'}{(1 + \Delta U)^\chi} \right]^2 + \left[\frac{Q'}{(1 + \Delta U)^\delta} \right]^2}{U^2} R_{eq} = \left(\frac{P'}{U} \right)^2 \left\{ \left[\frac{1}{(1 + \Delta U)^\chi} \right]^2 + \left[\frac{\tan \varphi'}{(1 + \Delta U)^\delta} \right]^2 \right\} R_{eq} \quad (27)$$

对于配变,将式(26)除以式(27)即得系统电压偏差导致的可变附加损耗率(下文简称电压偏差可变附加损耗率) λ_1 为:

$$\lambda_1 = \frac{1}{(1 + \Delta U)^2} \frac{1}{\left[\frac{\cos \varphi'}{(1 + \Delta U)^\chi} \right]^2 + \left[\frac{\sin \varphi'}{(1 + \Delta U)^\delta} \right]^2} - 1 \quad (28)$$

下面给出一些典型负荷的计算结果分析:

1)若不考虑负荷的电压调节效应,即将负荷看作恒功率负荷,则 $\chi = 0$ 、 $\delta = 0$,此时 $\lambda_1 \approx -2\Delta U - (\Delta U)^2$,即适当升高电网运行电压有利于降低配变可变损耗。

2)若将负荷看作恒电流,则有 $\chi = 1$ 、 $\delta = 1$,此时 $\lambda_1 = 0$,即配变可变损耗不受电压偏差影响;

3)若将负荷看作恒阻抗,则 $\chi = 2$ 、 $\delta = 2$,此时 $\lambda_1 = 2\Delta U + (\Delta U)^2$,即适当降低电网运行电压有利于降低配变可变损耗。

电压偏差影响下线路可变损耗的分析与计算方法与配变相同,在此不再赘述。

在工程应用中,通过测量负荷的有功功率静态电压特性系数 χ 、无功功率静态电压特性系数 δ 、功率因数角 φ' 以及电压偏差率 ΔU 可以得到配变和线路的电压偏差可变附加损耗率 λ_1 、 λ_2 ,从而计算出电压偏差引起的附加损耗和总损耗。

2 考虑电能质量影响的配电网损耗综合评估模型

2.1 10 kV 配电网综合损耗评估方法

当电网同时存在多种电能质量扰动时,理论上可以借助式(8)、(9)、(13)、(15)、(17)、(21)和式(28)分别评估各电能质量扰动引起的附加损耗率,进行综合后即可得到所有电能质量扰动引起的配电网总附加损耗。计算的关键在于要分析解耦各电能质量扰动引起的附加损耗可能存在的相互影响,避免漏算和重复计算。考虑到配电网的损耗分为固定损耗和可变损耗,两者受电能质量扰动影响的规律和程度都不一样,因此首先应该将配电网的固定损耗和可变损耗进行分离。其中,固定损耗主要受电压偏差影响,其他电能质量扰动对其影响很小,可忽略不计;在评估可变损耗时,谐波、三相电流不平衡、电压偏差3个因素存在一定的耦合关系,需要进行解耦。综上所述,考虑电能质量扰动的10 kV配电网综合损耗评估方法如图1所示,具体步骤见2.2节。

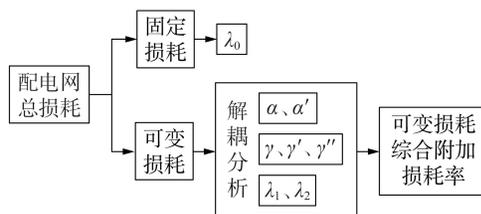


图1 考虑电能质量扰动的10 kV配电网综合损耗计算方法

Fig.1 Calculating method of comprehensive loss of 10 kV distribution network considering power quality disturbances

2.2 10 kV 配电网综合损耗计算步骤

1)分离出配电网的固定损耗,估算出电压偏差

影响下固定损耗的附加损耗率。固定损耗是产生在电力线路和配变等值并联电导上的损耗,与电压有关,配电网的固定损耗主要是配变的固定损耗。当每台配变的电压都可通过监测装置得到时,采用式(21)计算电压偏差导致的配网固定损耗的附加损耗率 $\lambda_{0\Sigma}$,从而精确计算出发生电压偏差后配电网的固定损耗 $\Delta P'_0$ 为:

$$\Delta P'_0 = (1 + \lambda_{0\Sigma}) \sum \Delta P_0 \quad (29)$$

式中: $\sum \Delta P_0$ 为所有配变在额定工作电压下的固定损耗之和,可近似为配变空载损耗之和。

2)分别估算谐波、三相电流不平衡、电压偏差影响下线路和配变可变损耗的附加损耗率。可变损耗指的是消耗在电力线路和配变电阻上的损耗,与负荷电流有关。当配电网各元件的谐波畸变率都存在监测值时,可以由式(8)和式(9)较为精确地估算谐波可变附加损耗率。按照式(13)、(15)和式(17)计算三相电流不平衡可变附加损耗率,按照式(28)计算电压偏差可变附加损耗率。

3)综合上述受单种电能质量扰动影响的可变损耗附加损耗率,分别得到线路和配变损耗受电能质量影响的可变损耗综合附加损耗率。

单种电能质量扰动导致的可变附加损耗可以直接相加,但是其附加损耗率如果要直接相加,则需要其基准值相同。在计算谐波、三相电流不平衡和电压偏差导致的可变附加损耗率时,都应该以元件在基波正序电流单独作用下的可变损耗作为基准。其中,谐波和三相电流平衡度变化时基波正序电流是不变的,其作用下的可变损耗也不变,可以直接测得。但是,电压偏差影响下的基波正序电流会产生变化,而电压偏差附加可变损耗率的基准定义为无电压偏差时元件在基波正序电流作用下的可变损耗,无法在存在电压偏差时直接测得。所以电压偏差可变附加损耗率在综合计算模型中,不能与其他电能质量扰动引起的可变附加损耗率直接相加。然而2个基准值比值恰好就是解耦后的电压偏差可变附加损耗率,因此可以采用相乘的方式计算综合附加损耗率。

通过上述分析可知,电能质量扰动造成单一元件可变损耗的综合附加损耗率 μ 为:

$$\mu = (1 + \lambda_x)(1 + \gamma_x + \alpha_x) - 1 \quad x = 1, 2 \quad (30)$$

式中: x 取值为1、2分别表示配变、线路,将对应元件的参数代入公式即可。

4)综合固定损耗和可变损耗的附加损耗率,得到计及电能质量扰动影响时配电网的总损耗。实际配电网中广泛存在辐射状馈线,所以需要分段计算线路和配变的损耗,最后相加得到配电网的总损耗,如式(31)所示。

$$\Delta P = \sum_{i=1}^L (1 + \mu_i) \Delta P_{li} + (1 + \lambda_{0\Sigma}) \sum_{i=1}^M \Delta P_{T0i} + \sum_{i=1}^M (1 + \mu_{Ti}) \Delta P_{Tii} \quad (31)$$

式中: ΔP 为10 kV配电网总损耗; ΔP_{li} 和 ΔP_{Tii} 分别为第*i*段馈线和第*i*台配变在基波正序电流作用下的可变损耗; ΔP_{T0i} 为第*i*台配变在额定电压下的固定损耗; μ_i 和 μ_{Ti} 分别为第*i*段馈线和第*i*台配变的综合附加损耗率,由式(30)计算得到。

因此,整个配电网的总附加损耗率为:

$$\mu_{\Sigma} = \frac{\Delta P - \left[\sum_{i=1}^L \Delta P_{li} + \sum_{i=1}^M (\Delta P_{T0i} + \Delta P_{Tii}) \right]}{\sum_{i=1}^L \Delta P_{li} + \sum_{i=1}^M (\Delta P_{T0i} + \Delta P_{Tii})} \quad (32)$$

3 物理实验及结果分析

3.1 实验方案及参数

为验证本文的计算方法,基于国家电网公司电力谐波特性分析评估技术实验室的10 kV / 2 MV·A电能质量扰动测试平台,搭建了含10 kV / 0.4 kV的配变、380 V配电线路和负载等的实验环境进行实验。电能质量综合试验平台主电路拓扑图如附录A图A1所示。其中,10 kV电能质量扰动模块由链式多电平逆变器构成,可模拟10 kV电压等级的谐波电压、三相不平衡电压和电压波动;380 V电流扰动源由电容柜、电抗柜及基于电力电子装置的电流扰动发生器组成,可以模拟380 V电压等级的无功负载、三相不平衡负载和非线性负载;待测试的10 kV配变和380 V配电线路串联在10 kV电能质量扰动模块和380 V电流扰动源之间。实验中使用的配变型号为S11-M-315 / 10,380 V配电线路为架空线路,型号为JKLYJ-1kV1×185,线路长度为160 m。具体参数如附录A表A2和表A3所示。负载为多级可调负载箱,每级可调功率60 kW,最大功率360 kW,实验中调至120 kW。实验中的采样频率为50 kHz,在配变高、低压侧和线路首、末端分别设置测量点,采用录波仪同时采样每个测量点的每相电压值和电流值,以保证采样精度。实验现场图如附录A图A2所示。

实验过程中,设置2种工作方式:①恒负载,即380 V低压侧投入固定的电抗负载,由10 kV电能质量扰动模块产生带有电能质量扰动的电压,从而在实验设备上产生各种电能质量扰动;②380 V电流扰动源和10 kV电压扰动源同时投入,10 kV电能质量扰动源产生带有电能质量扰动的电压,且低压侧负载设置为具有电能质量扰动的恒流源。

3.2 谐波实验

调节10 kV电能质量扰动模块在基波中分别叠加2—25次谐波电流,各次谐波的含有率以5%为

步长在 5%~20% 之间变化。各实验工况稳定运行后保持该工况下电压、电流不变,此时可认为谐波功率保持不变,然后利用 MATLAB 对稳定时的 10 个周期的电压和电流数据进行分析得到实测值。

对于线路,首先对测得的线路电流和线路首、末端电压值进行滑动窗快速傅里叶变换(FFT),分离出基波和各次谐波的值,然后利用 $P=UI \cos \varphi$ 得到线路首、末端的三相基波功率和谐波功率实测值,取首、末端的差值作为损耗 ΔP 实测值,谐波附加损耗率即为谐波附加损耗与基波损耗的比值,再利用 $\Delta P=I^2 R$ 得到基波电阻和各次谐波电阻的实测值,将基波电阻近似认为是直流电阻,谐波电阻和基波电阻的比值即为谐波系数实测值。将以 \sqrt{h} 倍直流电阻等效 h 次谐波电阻的常用模型^[5-6](下文简称常用模型)作为对比模型,常用模型中 $k_h = \sqrt{h}$; 本文模型中,采用式(3)~(7)计算线路的谐波系数 $k_h = 1 + \gamma_{sh} + \gamma_{ph}$,采用式(8)计算线路的谐波可变附加损耗率。

线路的谐波可变附加损耗率的实验实测值、本文模型计算值和常用模型^[5-6]计算值的对比如图 2 所示,谐波系数的实测值和计算值对比如附录 A 图 A3 所示,同次谐波下不同谐波含量的线路的谐波可变附加损耗率实测值和计算值对比图如附录 A 图 A4 所示。

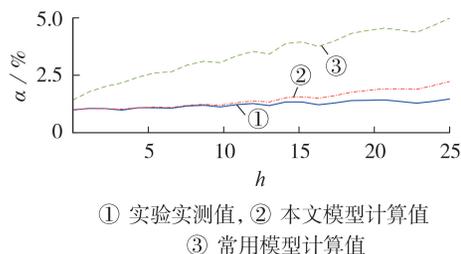


图 2 谐波含量为 10% 时线路谐波可变附加损耗率的实测值和模型计算值对比

Fig.2 Comparison between measured value and model calculated value of line harmonic variable additional loss rate when harmonic content is 10%

由图 A3 和图 2 可见,随着谐波次数的增大,线路的谐波系数和谐波可变附加损耗率增加,本文模型的计算结果的误差也随之增大,但是与常用模型相比,本文模型的误差较小,因此本文模型更加精确。由图 A4 可见,对同次谐波而言,谐波含量越高,线路的谐波可变附加损耗率越大,本文模型的计算误差越小。在考虑实验测量误差和计算误差等因素后,低次谐波的误差在可接受范围内,可验证 1.1 节中的线路谐波损耗计算模型在低次谐波下的正确性。由于实际配电网中低次谐波含量较高,该模型可应用于实际配电网线路的谐波损耗计算中。

配变谐波实验的数据处理方法与线路的相同,首先分离出测量得到的配变高、低压侧电流和电流

基波及各次谐波的值,然后利用 $P=UI \cos \varphi$ 得到配变高、低压侧的三相基波功率和谐波功率实测值,取高、低压侧的功率差值作为损耗值,此时得到的是总谐波附加损耗。同时,为了分离出带载时变压器的谐波可变附加损耗实测值,需要进行相同谐波条件下的变压器空载实验,利用 $P=UI \cos \varphi$ 计算得到谐波附加固定损耗实测值。则带载时的谐波附加可变损耗实测值为总谐波附加损耗实测值与对应空载实验测量所得的谐波附加固定损耗的差值,谐波附加可变损耗率为谐波附加可变损耗与基波损耗的比值。

本文模型采用式(9)计算配变谐波可变附加损耗率,根据谐波损耗成分占比取 $k_h = \sqrt{h}$ 。配变谐波附加可变损耗率的实验实测值、本文模型计算值以及文献[9]中采用谐波损耗因子的模型的计算值的对比如图 3 所示。由图 3 可看出,配变谐波可变附加损耗率随着谐波次数的增大而增加;低次谐波下,采用本文模型计算得到的谐波可变附加损耗率的误差较小,高次谐波下则误差较大,但均小于文献[9]中模型对应的误差,这说明 1.1 节中的配变谐波损耗计算模型优于常用模型。考虑实际配电网中的谐波情况,本文配变谐波损耗计算模型可应用于实际配电网的配变谐波损耗计算中。

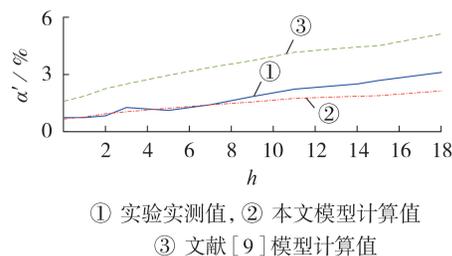


图 3 谐波含量为 10% 时配变谐波可变附加损耗率的实测值和模型计算值对比

Fig.3 Comparison between measured value and model calculated value of distribution transformer harmonic variable additional loss rate when harmonic content is 10%

3.3 三相电流不平衡实验

调节 10 kV 电能质量扰动源使三相电流不平衡度在 0~20% 之间以 2% 为步长变化。利用 MATLAB 分析稳定时测量点采样所得的 10 个周期的数据。为了解耦各类电能质量扰动问题引起的附加损耗,三相电流不平衡实验中只考虑基波损耗。首先对测得的电流和电压数据进行滑动窗 FFT 分析,从而分离出基波值,然后使用对称分量法分离出基波的正序、零序和负序值,再利用 $P=UI \cos \varphi$ 计算三相电流不平衡时的损耗实测值。三相电流平衡时的损耗实测值则取基波正序电流和电压作用下的基波正序损

耗值,三相电流不平衡附加损耗实测值为三相电流不平衡损耗实测值与三相电流平衡时的损耗实测值的差值。三相电流不平衡附加损耗率实测值即为三相电流不平衡附加损耗值与三相电流平衡时的损耗值的比值。

对于线路,测量的电量为线路电流和首末端电压,线路损耗实测值取线路首、末端三相功率的差值。然后依次计算三相电流不平衡附加损耗实测值和三相电流不平衡附加损耗率实测值。配电网中的380 V线路为三相四线制,因此三相电流不平衡时,本文模型采用式(14)计算线路损耗,采用式(15)计算三相电流不平衡附加损耗率。线路三相电流不平衡附加损耗率的实验实测值与本文模型的计算值以及文献[10]中采用三相电流幅值不平衡度作为指标的模型的计算值的对比如图4所示。

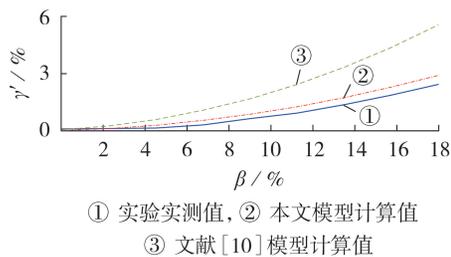


图4 线路三相电流不平衡可变附加损耗率的实测值和模型计算值对比

Fig.4 Comparison between measured value and model calculated value of three-phase current unbalanced line variable additional loss rate

由图4可看出,随着三相不平衡度的增加,线路的三相不平衡可变附加损耗率增大;本文模型的计算误差较小,且小于文献[10]中模型的计算误差。考虑测量误差和计算误差等因素,本文模型的计算误差在可接受范围内,可验证1.2节中线路三相不平衡损耗计算模型的有效性和精确性。

对于配变,测量的电量为配变高、低压侧的电压和电流值,配变损耗实测值取高、低压侧三相功率的差值。本文模型采用式(16)、(17)分别计算配变的三相电流不平衡可变损耗、三相电流不平衡可变附加损耗率。配变的三相不平衡可变附加损耗率的实验实测值与本文模型的计算值以及文献[11]中模型的计算值的对比如图5所示。

由图5可看出,随着三相不平衡度的增加,配变的三相电流不平衡可变附加损耗率增大,本文模型的误差也随之增大,但比文献[11]中的模型的误差小,表明1.2节中的配变三相不平衡损耗计算模型更为精确。

3.4 电压偏差实验

调整10 kV电能质量扰动源的相电压与额定电压的偏差在-10%~10%之间以2%为步长变化。由

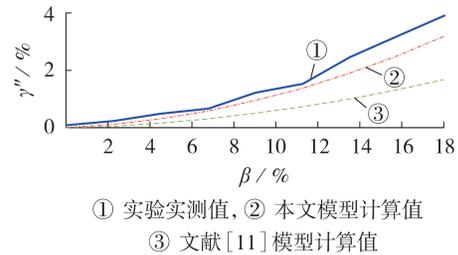


图5 配变三相电流不平衡可变附加损耗率的实测值和模型计算值对比

Fig.5 Comparison between measured value and model calculated value of three-phase current unbalanced distribution transformer variable additional loss rate

于所带负载为恒阻抗负载,取 $\chi=2$ 、 $\delta=2$,电压偏差影响下的固定损耗和可变损耗附加率计算公式相同,因此依然分别分析线路和配变的损耗。

为了解耦各类电能质量扰动引起的附加损耗,电压偏差实验中同样只考虑基波损耗,与三相电流不平衡实验的数据处理方法类似,首先分离出基波值,利用 $P=UI\cos\varphi$ 计算电压偏差损耗值,并将电压偏差为0时的损耗实测值作为参考值,则两者的差值为电压偏差附加损耗实测值。电压偏差附加损耗率实测值为电压偏差附加损耗实测值与无电压偏差时的参考值的比值。

线路损耗实测值取线路首、末端三相基波功率的差值,再依次计算电压偏差可变附加损耗实测值和电压偏差可变附加损耗率实测值。本文模型基于1.3节计算电压偏差可变附加损耗率。线路电压偏差可变附加损耗率 λ_2 的实测值和本文模型的计算值以及文献[13]取不平衡系数为1的模型的计算值的对比如图6所示。

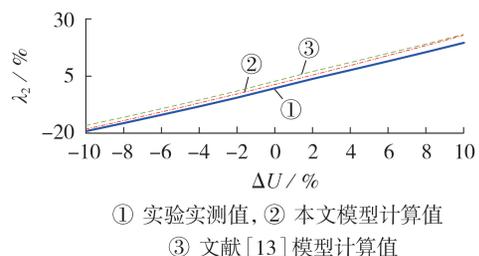


图6 线路电压偏差可变附加损耗率的实测值和模型计算值对比

Fig.6 Comparison between measured value and model calculated value of line voltage deviation variable additional loss rate

由图6可看出,随着电压偏差的增大,线路的电压偏差可变附加损耗率增大;本文模型的计算误差很小,且小于文献[13]中模型的计算误差,这表明1.3节中计及电压偏差的损耗计算模型优于常用模型,精确度较高。

配变的损耗实测值取为高、低压侧三相基波功

率的差值,本文模型采用式(28)计算配变电压偏差可变附加损耗率,则配变电压偏差可变附加损耗率的实测值和本文模型计算值以及文献[12]中模型的计算值的对比如图7所示。

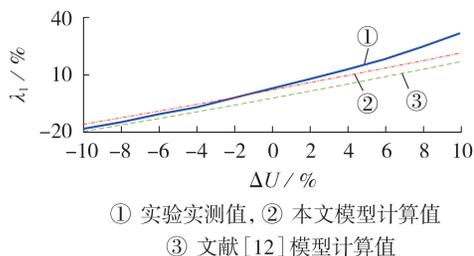


图7 配变电压偏差可变附加损耗率的实测值和模型计算值的对比

Fig.7 Comparison between measured value and model calculated value of distribution transformer voltage deviation variable additional loss rate

由图7可看出,随着电压偏差的增大,配变的电压偏差可变附加损耗率增加,考虑实验测量误差和计算误差等因素,本文模型的计算误差在可接受范围内,且比文献[12]中模型的计算结果误差小,这验证了1.3节的计及电压偏差的损耗计算模型的有效性。

3.5 复合电能质量扰动实验

首先在额定状态下运行实验平台,测量得到无电能质量扰动影响的电压和电流值,利用 $P=UI\cos\varphi$ 计算得到配电网的全波损耗实测值作为参考值;然后调节10 kV电能质量扰动源在基波中叠加组合次谐波电流,同时调整三相电流不平衡度和电压偏差,使配电网中存在多种电能质量扰动。分析测量数据,得到复合电能质量扰动影响下的配电网全波损耗实测值,其与参考值之间的差值即为复合电能质量扰动带来的附加损耗实测值,总附加损耗率实测值则为附加损耗值与参考值的比值,本文模型采用式(32)计算总附加损耗率。表1为多组实验中的配电网总附加损耗率实测值和本文模型的计算值的对比。

表1 复合电能质量扰动影响下附加损耗率实测值和模型计算值

Table 1 Measured value and calculated value of additional loss rate under influence of compound power quality disturbances

组别	电能质量扰动	$\mu_{\Sigma} / \%$	
		实测值	模型计算值
1	叠加5、7、11次谐波电流各20%,调整三相电流不平衡度为30%	27.352	27.460
2	叠加5、7、11次谐波电流各20%,调整三相电流不平衡度为55%	51.657	51.912
3	叠加5、7、11次谐波电流各20%,调整三相电流不平衡度为30%,电压偏差为-10%	17.202	18.242

由表1可看出,在谐波、三相电流不平衡和电压偏差的复合电能质量扰动的影响下,本文模型的计算误差更小,可验证本文提出的复合电能质量扰动影响下的配电网综合损耗计算模型在实际应用中的有效性。

4 结论

1)本文分别提出了谐波、三相电流不平衡、电压偏差3类电能质量单独作用下的配电网损耗和附加损耗率的计算模型,并通过物理实验验证了模型的有效性。同时对比了常用的计及单一电能质量扰动的损耗计算模型,结果表明本文模型能够更加精确地计算配电网损耗。

2)本文提出了考虑谐波、三相电流不平衡和电压偏差的复合电能质量扰动的10 kV配电网损耗计算模型。该模型将配电网损耗分为固定损耗和可变损耗,对各类电能质量扰动的影响进行解耦,利用单一电能质量扰动导致的附加损耗率计算出配电网的总附加损耗率,从而计算配电网总损耗。通过物理实验验证了本文配电网损耗综合评估模型在复合电能质量扰动影响下的有效性,该模型应用于实际10 kV配电网损耗的计算中时可以有效提高计算的准确度。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] LANGERUDY A T, MARISCOTTI A, ABOLHASSANI M A. Power quality conditioning in railway electrification: a comparative study[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(8): 6653-6662.
- [2] 易桂平, 胡仁杰. 分布式电源接入电网的电能质量扰动研究综述[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(1): 38-46.
YI Guiping, HU Renjie. Survey on the power quality question resultant from connection of distributed power generation to the grid[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(1): 38-46.
- [3] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32, 39.
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32, 39.
- [4] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [5] WAKILEH G J. Power systems harmonics: fundamentals, analysis and filter design[M]. Berlin, Germany: Springer Science & Business Media, 2001: 145-147.
- [6] 李琼林, 代双寅, 丁同, 等. 基于主客观组合赋权法的低压配电网电能质量能耗综合评估[J]. 电测与仪表, 2020, 57(12): 52-59.
LI Qionglin, DAI Shuangyin, DING Tong, et al. Comprehensive evaluation of power quality energy consumption in low voltage distribution network based on subjective and objective combination weighting method[J]. Electrical Measurement &

- Instrumentation, 2020, 57(12):52-59.
- [7] 王毅, 刘书铭, 李琼林, 等. 低压配电路谐波电阻损耗模型参数辨识及实验验证[J]. 电网技术, 2021, 45(4):1480-1486.
WANG Yi, LIU Shuming, LI Qionglin, et al. Parameter identification and experimental verification of harmonic resistance loss model in low-voltage distribution lines[J]. Power System Technology, 2021, 45(4):1480-1486.
- [8] 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, 88.
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, 88.
- [9] IEEE. IEEE recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents; IEEE Std C57.110—2008[S]. New York, NY, USA: IEEE, 2008.
- [10] 尹忠东, 张静. 复合电能质量扰动下配电网关键设备附加损耗的研究[J]. 电气应用, 2019, 38(3):12-20.
- [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.
LIU Shuming, SHI Hong, FENG Lei. Transformer harmonic loss model considering skin effect and proximity effect[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3):133-139.
- [12] 危乃盛. 配电网损耗精确计算分析[J]. 能源与环境, 2005(3):95-96, 101.
- [13] 贺哲, 钟庆, 许中, 等. 低压台区电压损耗综合估算模型[J]. 电气应用, 2017, 36(10):24-27.
- [14] 蒋利民, 孟珺遐, 张静, 等. 复合电能质量扰动下低压配电网中关键设备附加损耗的解耦分析[J]. 电测与仪表, 2019, 56(24):59-66.
JIANG Limin, MENG Junxia, ZHANG Jing, et al. Decoupling analysis of additional loss of key equipment in low voltage distribution network under complex power quality disturbance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(24):59-66.
- [15] 李健荣. 降低配电网损耗的方法[J]. 云南电力技术, 2006(3):12-14.
- [16] AGAMLOH E B, PEELE S, GRAPPE J. A comparative analysis of voltage magnitude deviation and unbalance on standard and premium efficient induction motors[C]//Conference Record of 2012 Annual IEEE Pulp and Paper Industry Technical Conference. Portland, OR, USA: IEEE, 2012:1-8.

作者简介:



李琼林

李琼林(1980—),男,湖北英山人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统电能质量分析与控制(**E-mail**: yingshanli_2001@163.com);

刘书铭(1984—),男,河南安阳人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统电能质量分析与控制(**E-mail**: losuwing@126.com)。

(编辑 任思思)

Calculation model of 10 kV distribution network loss considering power quality impact and its experimental verification

LI Qionglin¹, LIU Shuming¹, WEN Jiaying², WANG Yi¹, DAI Shuangyin¹, TAN Tianyuan², LIU Kaipei²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With the continuous development of smart power grid, power quality disturbance is increasing day by day. Therefore, it is of great significance to explore the power distribution network loss calculation model considering power quality factors for energy conservation and loss reduction of power system. The calculation models of 10 kV distribution network loss under the influence of three common power quality disturbances, i.e. harmonic, three-phase current unbalance and voltage deviation, are respectively given. Then simultaneously considering multiple power quality disturbances, the evaluation method of 10 kV distribution network loss is proposed and the corresponding calculation model is established, which improves the theoretical calculation accuracy of 10 kV distribution network loss. The comprehensive evaluation process is divided into fixed loss and variable loss evaluation. In the fixed loss evaluation, the influence of voltage deviation on the fixed loss of the transformer is mainly considered. In the variable loss evaluation, the above three power quality disturbances are decoupled and evaluated, and then the comprehensive additional loss rate of variable loss of 10 kV distribution network is comprehensively estimated. Finally, the correctness of the proposed model and the corresponding model are verified through experiments.

Key words: power quality; 10 kV distribution network loss; harmonics; three-phase current unbalance; voltage deviation

附录 A

表 A1 k_s 、 k_p 的取值
Table A1 Value of k_s and k_p

导线类型	是否干燥浸渍	k_s	k_p
圆形、紧压	是	1	0.8
圆形、紧压	否	1	1
圆形、分裂	是	0.435	0.37
扇形	是	1	0.8
扇形	否	1	1

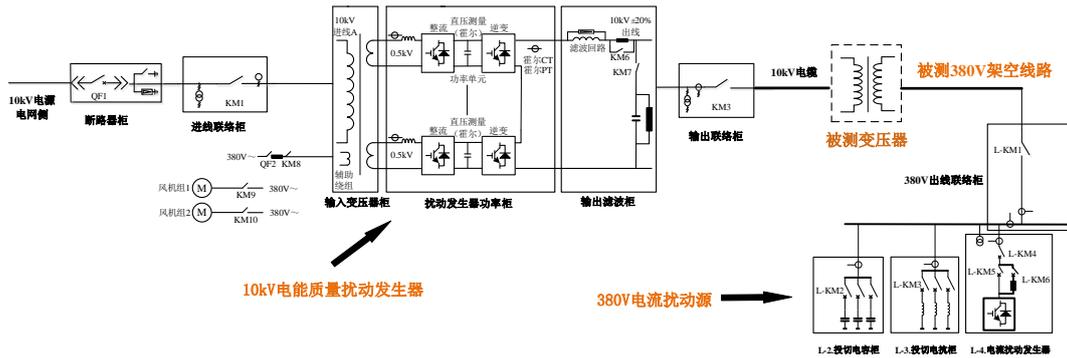


图 A1 电能质量综合试验平台主电路拓扑图

Fig.A1 Topology diagram of main circuit of power quality comprehensive test platform

表 A2 实验用配变参数

Table A2 Parameters of distribution transformer used in experiment

参数	参数值
型号	S11-M-315/10
额定容量	315kV · A
高压侧额定电压	10kV ± 5%
低压侧额定电压	0.4kV
连接组	Dyn11
空载损耗	480W
负载损耗	3650W
短路阻抗	3.89%
空载电流	1.4%

表 A3 实验用线路参数

Table A3 Parameters of line used in experiment

参数	参数值
型号	JKLYJ-1kV 1×185
标称截面	185mm ²
20°C时导体直流电阻	0.164Ω/km
20°C时导线电阻率	0.028264Ω · mm ² /m
电阻温度系数	0.00429
最高使用温度	70°C



图 A2 实验现场

Fig.A2 Experimental scene

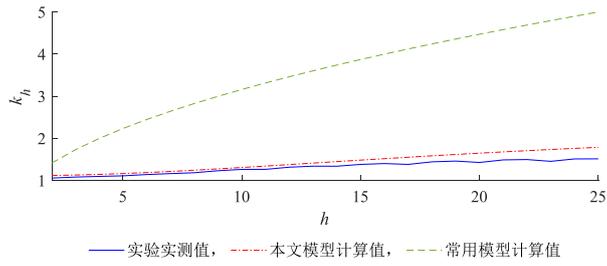


图 A3 线路谐波系数的实测值和模型计算值对比

Fig.A3 Comparison between measured value and model calculated value of line harmonic coefficient

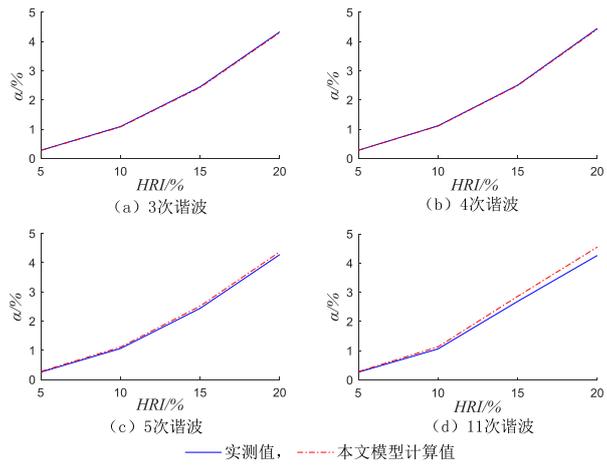


图 A4 3、4、5、11 次线路谐波附加损耗率的实测值和本文模型计算值对比

Fig.A4 Comparison between measured value and model calculated value of additional loss rate of 3rd-, 4th-, 5th- and 11th-order line harmonics