复合电能质量扰动下配电网关键设备附加损耗的研究

随着冲击性、非线性负荷的广泛应用以及低压配电网中大量单相用户的涌现，谐波、三相不平衡等电能质量问题日益突出。配电网损耗是综合反映电力网规划设计、生产运行和经营管理水平的主要经济技术指标，因此研究低压配电网中关键设备在复合电能质量扰动下的附加损耗具有重要的意义。首先理论推导了关键设备在谐波及三相不平衡扰动共同存在时的附加损耗，并在Matlab/Simulink仿真平台中验证了理论推导的准确性。在此基础上，综合分析了这两种电能质量问题同时存在时与单独存在时附加损耗的仿真数据，得到复合电能质量扰动下的附加损耗不满足叠加定理，且谐波及三相不平衡共同存在时关键设备的附加损耗小于各自单独存在造成的附加损耗之和。

尹忠东 张静/新能源电力系统国家重点实验室（华北电力大学）

尹忠东/教授

关键词/Keywords

谐波·
三相不平衡·
复合电能质量扰动·
附加损耗·

0 引言

电能质量问题日益严重，对配电网最直接的影响是增加系统的有功电能损耗，我国低压配电网的电能损耗占供配电网总损耗的50% ～60%。电能质量问题造成的低压配电网附加损耗增大，直接影响着电网企业的经营效益[1-3]。

目前国内外的研究多集中在谐波和三相不平衡对低压配电网损耗的影响分析及相应的治理措施方面，且多为针对单一电能质量问题的研究。文献[4-5]主要集中在谐波、三相不平衡的检测研究；文献[6-8]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[9-11]研究了三相不平衡、谐波的治理方案。但实际低压配电网中包含多种电能质量问题，因此研究多种电能质量扰动下低压配电网的附加损耗具有重要意义。

在众多电能质量问题中，谐波以及三相不平衡对低压配电网损耗造成的影响较大[12]。同时随着“十三五”规划节能减排等相关政策的推进，低压配电网的节能潜力更加突出，因此计算低压配电网关键设备（即变压器及配电线路）在谐波、三相不平衡等电能质量问题下的附加损耗是节能降耗的理论基础[13]。本文在上述论文的研究基础上推导了谐波、三相不平衡单独存在时，低压配电网关键设备的附加损耗，继而深入研究了两种电能质量扰动同时存在时，低压配电网关键设备的附加损耗。为了验证理论推导的有效性及合理性，在Matlab软件中对其进行了仿真验证，并利用仿真数据进一步分析了两种电能扰动同时存在时关键设备的附加损耗与单独存在时附加损耗的关联性。

1 三相不平衡附加损耗推导

由于单相负荷的存在以及我国城乡广泛采用三相四线制的接线方式，加上受负荷同时率的影响，导致配电网三相不平衡[14]。理想的三相交流电力系统中，三相电压幅值相等、频率相同及相位互差120°，此时系统处于三相平衡状态。但由于某些原因使三相电压或电流出现幅值不同、相角不对称的现象，则被称为三相不平衡。三相不平衡度是指三相不平衡的程度，国标中是用电压、电流负序基波分量或零序基波分量与正

序基波分量的方均根值的百分比表示[15]。由于表示方式不够直观，本文采用IEEEstd112—1991的表示方法，即用β_A、β_B和β_C来表示各相的三相不平衡程度，以此分析三相不平衡程度对低压配电网关键设备附加损耗的影响，这样可以更加直观地表征三相不平衡指标与附加损耗之间的内在联系。

各相的三相不平衡度可表示为

$$\beta_\alpha = \frac{I_\alpha - I_{av}}{I_{av}} \times 100\% \tag{1}$$

式中，I_α（α=A, B, C）为各相电流有效值；I_{av}为三相电流有效值的平均值，即$I_{av}=(I_A+I_B+I_C)/3$。

同时引入最大不平衡度为

$$\beta_{max} = \frac{\max\{|I_A - I_{av}|, |I_B - I_{av}|, |I_C - I_{av}|\}}{I_{av}} \tag{2}$$

当系统中出现三相不平衡现象时，此时三相电流可分别表示为

$$\begin{cases} \boldsymbol{I}_A = I_{av}(1+\beta_A)\angle\varphi_A \\ \boldsymbol{I}_B = I_{av}(1+\beta_B)\angle\varphi_B \\ \boldsymbol{I}_C = I_{av}(1+\beta_C)\angle\varphi_C \end{cases} \tag{3}$$

式中，φ_A、φ_B和φ_C分别为A相、B相和C相电流的相角。

1.1 配电变压器的三相不平衡附加损耗

（1）附加铁损

三相不平衡时配电变压器附加铁损是变压器在三相不平衡运行时零序电流产生的漏磁通在结构件（夹件、压板和油箱等）上引起的涡流损耗。配电变压器绕组的连接方式不同，其零序等效电路及零序阻抗大小也不同，本文研究Dyn11接线的变压器附加铁损，对于Dyn11联结方式的变压器，其绕组接线及零序等效电路如图1所示。

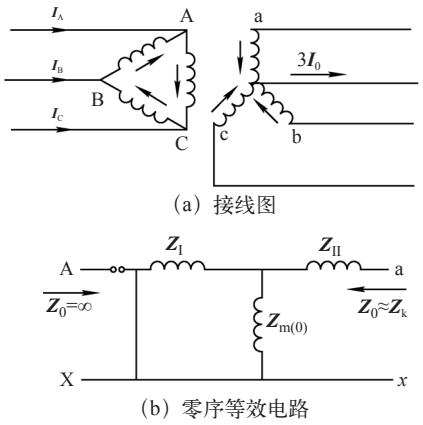


图1 Dyn11联接方式变压器接线图及零序等效电路

该连接方式下，零序电流在变压器一次侧、二次侧绕组内均构成回路。二次侧零序电流中只有很小一部分为励磁电流，产生的漏磁通较小，漏磁场在结构件中引起的涡流损耗较小，可忽略[16]。

（2）附加铜损

三相绕组电流平衡时，变压器绕组损耗为

$$P_{T1} = 3\times[(I_A + I_B + I_C)/3]^2 R_T = 3I_{av0}^2 R_T \tag{4}$$

式中，I_{av0}为没有电能质量扰动时三相电流有效值的平均值；R_T为变压器绕组的直流电阻。

三相绕组电流不平衡时，变压器绕组损耗为

$$\begin{aligned} P_{T2} &= (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)R_T \\ &= I_{av}^2[(1+\beta_A)^2 + (1+\beta_B)^2 + (1+\beta_C)^2]R_T \\ &= I_{av}^2[3+\beta_A^2 + \beta_B^2 + \beta_C^2]R_T \\ &= K_T I_{av}^2 R_T \end{aligned} \tag{5}$$

式中，K_T为变压器的三相不平衡度系数。

计算低压配电网三相不平衡损耗时，通常忽略变压器的附加铁损，此时低压配电变压器的附加损耗可以表示为

$$\Delta P_T = P_{T2} - P_{T1} = K_T I_{av}^2 R_T - 3I_{av0}^2 R_T \tag{6}$$

电流三相不平衡虽然包括幅值和相角两个方面，但是相角不对称对变压器附加损耗的计算没有影响，故式（6）为配电变压器在三相电流不平衡时的附加损耗。

1.2 配电线路的三相不平衡附加损耗

在三相四线制低压配电网中，电流相角不对称对各相线路附加损耗没有影响，但会在中性线上产生不平衡电流，进而对中性线损耗产

生影响。因此当三相电流不平衡时，既要推导各相线的附加损耗，还要推导中性线的附加损耗。

（1）配电线路相线的附加损耗

三相电流平衡时，低压配电网相线上的损耗为

$$P_{L1}=3\times[(I_A+I_B+I_C)/3)]^2R_L=3I_{av0}^2R_L \tag{7}$$

三相电流不平衡时，低压配电网相线上的损耗为

$$\begin{aligned}P_{L2}&=(I_A^2+I_A^2+I_A^2)I_{av}^2R_L\\&=[(1+\beta_A)^2+(1+\beta_B)^2+(1+\beta_C)^2]I_{av}^2R_L\\&=\left(\beta_A^2+\beta_B^2+\beta_C^2+3\right)I_{av}^2R_L\\&=K_LI_{av}^2R_L\end{aligned} \tag{8}$$

式中，K_L为配电线路相线的三相不平衡度系数；R_L为配电线路相线的直流电阻。

低压配电网线路上，由于三相不平衡产生的相线附加损耗可表示为

$$\Delta P=P_{L2}-P_{L1}=K_LI_{av}^2R_L-3I_{av0}^2R_L \tag{9}$$

（2）配电线路中性线的附加损耗

三相电流平衡时，三相四线制低压配电网中性线上的电流为0；而三相不平衡时，中性线上的电流为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{I}_0&=\boldsymbol{I}_A+\boldsymbol{I}_B+\boldsymbol{I}_C\\&=I_{av}[(1+\beta_A)\cos\varphi_A+(1+\beta_B)\cos\varphi_B+\\&\quad(1+\beta_C)\cos\varphi_C]+\mathrm{j}I_{av}[(1+\beta_A)\sin\varphi_A+\\&\quad(1+\beta_B)\sin\varphi_B+(1+\beta_C)\sin\varphi_C]\end{aligned} \tag{10}$$

则中性线上的损耗为

$$\Delta P_0=I_0^2R_0=(a^2+b^2)I_{av}^2R_0 \tag{11}$$

式中，$a=(1+\beta_A)\cos\varphi_A+(1+\beta_B)\cos\varphi_B+(1+\beta_C)\cos\varphi_C$；$b=(1+\beta_A)\sin\varphi_A+(1+\beta_B)\sin\varphi_B+(1+\beta_C)\sin\varphi_C$；$R_0$为中性线的直流电阻。

故三相四线制低压配电线路的附加损耗为

$$\begin{aligned}P_{Lall}&=\Delta P_L+\Delta P_0=(\beta_A^2+\beta_B^2+\beta_C^2+3)I_{av}^2R_L\\&\quad-3I_{av0}^2R_L+(a^2+b^2)I_{av}^2R_0\\&=K_LI_{av}^2R_L-3I_{av0}^2R_L+K_0I_{av}^2R_0\end{aligned} \tag{12}$$

式中，K_0为中性线的三相不平衡度系数。

由式（12）可知，配电线路相线的三相不平衡度系数K_L和中性线的三相不平衡度系数K_0越大，配电线路的附加损耗越大，且配电线路附加损耗与这两个不平衡度系数呈正比关系。

2 谐波附加损耗推导

电力电子装置在配电网中的广泛应用，使线路中存在大量电压、电流谐波，而配电网与作为谐波源的各类非线性负荷处于同一电压等级，因此配电网的附加损耗受谐波的影响很大。从电力设备的角度看，谐波损耗最终体现在变压器和线路的损耗，但各设备的损耗分类较为复杂，本文均按照其性质分为基波损耗和谐波损耗。

国标中谐波的定义是对周期性交流量进行傅里叶级数分解，得到的频率为基波频率大于1的整数倍的分量[17]。在频域分析中，将畸变的周期性电流分解成傅里叶级数，写成如下形式

$$i(t)=\sum_{h=1}^{M}\sqrt{2}I_h\sin(h\omega_1t+\varphi_h) \tag{13}$$

式中，ω_1为工频（即基波）的角频率；h为谐波次数；I_h为第h次谐波电流的方均根值；φ_h为第h次谐波电流的初相角；M为所考虑的谐波最高次数。

为了描述正弦波形的畸变程度，本文利用各次谐波电流的谐波含有率HRI_h来计算附加损耗，即

$$\mathrm{HRI}_h=\frac{I_h}{I_1}\times100\% \tag{14}$$

2.1 配电变压器的谐波附加损耗

谐波对变压器铁心的影响主要是增加铁心的磁滞损耗和涡流损耗。一般状况下谐波的频率远远低于变压器的自振频率，故配电网中存在谐波时与只有基波时变压器的铁耗差别不大，且与谐波引起变压器铜耗相比数值较小，因此谐波对变压器铁耗的影响可以忽略[18]。而变压器绕组在谐波电流的影响下会产生趋肤效应和邻近效应，进而对绕组的电阻值产生影响，变压器绕组在第h次谐波下的等效电阻可以表示为

$$R_{Th}=\sqrt{h}R_T \tag{15}$$

式中，R_{Th}为第h次谐波作用时变压器绕组的等效电阻；$\sqrt{h}$为谐波电阻修正系数。

在忽略了谐波引起的变压器铁损变化的情况下，变压器的等效电路如图2所示。

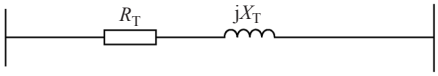


图2 变压器等效电路

不存在谐波时配电变压器的损耗为

$$P_{T1}=3I_1^2R_T \tag{16}$$

以谐波含有率表征的在各次谐波的影响下配电变压器附加损耗为

$$\Delta P_{Th}=3I_h^2R_{Th}=3\sum_{h=2}^{\infty}\mathrm{HRI}_h^2I_1^2\sqrt{h}R_h \tag{17}$$

式（17）即为以谐波含有率表征的配电变压器在谐波影响下的附加损耗计算公式。

2.2 配电线路的谐波附加损耗

配电线路的谐波损耗为各次谐波损耗之和，故线路谐波附加损耗为

$$\Delta P_{Lh}=3\sum_{h=2}^{\infty}I_h^2R_{Lh} \tag{18}$$

式中，R_{Lh}为配电线路的第h次谐波电阻。

若用各次谐波含有率HRI_h表示，则

$$\Delta P_{Lh}=3\sum_{h=2}^{\infty}\mathrm{HRI}_h^2I_1^2R_{Lh} \tag{19}$$

由式（19）可知，谐波附加损耗不仅与各次谐波含有率有关，还与谐波阻抗有关。当谐波次数较高时，线路中会出现趋肤效应，且随着谐波次数的增加，趋肤效应越明显。

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[19-21]，本文综合考虑后决定采用应用较为广泛的确定谐波阻抗的方法，即在谐波环境下线路各次谐波阻抗为

$$R_{Lh}=\sqrt{h}R_L \tag{20}$$

因而线路的谐波附加损耗计算公式可转化为

$$\Delta P_{Lh}=3\sum_{h=2}^{\infty}\mathrm{HRI}_h^2I_1^2\sqrt{h}R_L \tag{21}$$

由式（21）可以看出，线路的谐波附加损耗与各次谐波电流的含有率HRI_h以及基波电流有效值的二次方成正比，各次谐波电流的含有率HRI_h越大，则由谐波引起的线路的附加损耗越大。

3 复合电能质量扰动下附加损耗的推导

上述三相不平衡度均是在默认不含谐波的情况下进行分析的，当配电网中既存在谐波又存在三相不平衡时，需要引入谐波三相不平衡度，即

$$\begin{cases}\beta_{Ah}=\dfrac{I_{Ah}-I_{avh}}{I_{avh}}\times100\%\\ \beta_{Bh}=\dfrac{I_{Bh}-I_{avh}}{I_{avh}}\times100\%\\ \beta_{Ch}=\dfrac{I_{Ch}-I_{avh}}{I_{avh}}\times100\%\end{cases} \tag{22}$$

式中，β_{Ah}、β_{Bh}和β_{Ch}分别为A、B和C相的第h次谐波电流的三相不平衡度。

考虑谐波、三相不平衡两种电能质量扰动同时存在时，理论推导低压配电网关键设备附加损耗的计算公式。将三相不平衡度分解成基波电流的三相不平衡度和谐波电流的三相不平衡度，再分别计算基波损耗和谐波损耗，从而得到低压配电网关键设备在谐波及三相不平衡这两种电能质量扰动下的附加损耗计算公式。

配电变压器在复合电能质量扰动下的附加损耗计算式为

$$\begin{aligned}\Delta P_T&=\Delta P_{T1}+\Delta P_{Th}\\&=(\beta_{A1}^2+\beta_{B1}^2+\beta_{C1}^2+3)I_{av}^2R_T-3I_{av0}^2R_T+\\&\quad\sum_{h=2}^{\infty}(\beta_{Ah}^2+\beta_{Bh}^2+\beta_{Ch}^2+3)I_{avh}^2R_{Th}\\&=\sum_{h=1}^{\infty}K_{Th}I_{avh}^2\sqrt{h}R_T-3I_{av0}^2R_T\end{aligned} \tag{23}$$

式中，ΔP_{T1}为变压器的基波附加损耗；ΔP_{Th}为变压器的谐波附加损耗；I_{avh}为第h次谐波三相平均电流值，即$I_{avh}=(I_{Ah}+I_{Bh}+I_{Ch})/3$；$K_{Th}$为变压器第$h$次谐波电流的三相不平衡度系数。

配电线路在复合电能质量扰动下的附加损耗计算式为

$$\begin{aligned}\Delta P_{\mathrm{Lall}} &= \Delta P_{\mathrm{L1}}+\Delta P_{01}+\Delta P_{Lh}+\Delta P_{Lh}\\ &=(\beta_{\mathrm{A1}}^2+\beta_{\mathrm{B1}}^2+\beta_{\mathrm{C1}}^2+3)I_{\mathrm{av}}^2R_{\mathrm{L}}-3I_{\mathrm{av0}}^2R_{\mathrm{L}}+(a_1^2+b_1^2)I_{\mathrm{av}}^2R_0+\\ &\quad\sum_{h=2}^{\infty}(\beta_{\mathrm{A}h}^2+\beta_{\mathrm{B}h}^2+\beta_{\mathrm{C}h}^2+3)I_{\mathrm{av}h}^2R_{\mathrm{L}h}+\sum_{h=2}^{\infty}(a_h^2+b_h^2)I_{\mathrm{av}h}^2R_{0h}\\ &=\sum_{h=1}^{\infty}K_{\mathrm{L}h}I_{\mathrm{av}h}^2\sqrt{h}R_{\mathrm{L}h}-3I_{\mathrm{av0}}^2R_{\mathrm{L}}+\sum_{h=1}^{\infty}K_{0h}I_{\mathrm{av}h}^2\sqrt{h}R_{0h}\end{aligned} \tag{24}$$

式中，ΔP_{L1}为配电线路相线的基波附加损耗；ΔP_{01}为中性线的基波附加损耗；$\Delta P_{\mathrm{L}h}$为配电线路相线的谐波附加损耗；ΔP_{0h}为中性线的谐波附加损耗；$K_{\mathrm{L}h}$为配电线路相线第h次谐波电流的三相不平衡度系数；K_{0h}为中性线第h次谐波电流的三相不平衡度系数。

其中

$$a_h=(1+\beta_{\mathrm{A}h})\cos\varphi_{\mathrm{A}h}+(1+\beta_{\mathrm{B}h})\cos\varphi_{\mathrm{B}h}+(1+\beta_{\mathrm{C}h})\cos\varphi_{\mathrm{C}h} \tag{25}$$

$$b_h=(1+\beta_{\mathrm{A}h})\sin\varphi_{\mathrm{A}h}+(1+\beta_{\mathrm{B}h})\sin\varphi_{\mathrm{B}h}+(1+\beta_{\mathrm{C}h})\sin\varphi_{\mathrm{C}h} \tag{26}$$

式中，$\varphi_{\mathrm{A}h}$、$\varphi_{\mathrm{B}h}$和$\varphi_{\mathrm{C}h}$分别为A、B和C 相的第h次谐波电流的相角。

根据变压器和配电线路在复合电能质量扰动下附加损耗的理论推导，可以得到低压配电网关键设备的总附加损耗为

$$\begin{aligned}\Delta P=\Delta P_{\mathrm{T}}+\Delta P_{\mathrm{Lall}}&=\sum_{h=1}^{\infty}K_{\mathrm{T}h}I_{\mathrm{av}h}^2\sqrt{h}R_{\mathrm{T}}-3I_{\mathrm{av0}}^2R_{\mathrm{T}}+\\ &\sum_{h=1}^{\infty}K_{\mathrm{L}h}\sqrt{h}I_{\mathrm{av}h}^2R_{\mathrm{L}h}-3I_{\mathrm{av0}}^2R_{\mathrm{L}}+\sum_{h=1}^{\infty}K_{0h}\sqrt{h}I_{\mathrm{av}h}^2R_{0h}\end{aligned} \tag{27}$$

根据式（27）可以看出，复合电能质量扰动下低压配电网中关键设备的附加损耗与各次谐波含有率以及各次谐波电流的三相不平衡度都有密切的关系。

为了得到低压配电网关键设备附加损耗与谐波、三相不平衡指标的量化关系，本文给出了损耗增量比的概念，即

$$\delta=\frac{\Delta P}{P}\times100\% \tag{28}$$

式中，ΔP为低压配电网关键设备的附加损耗；P为理想状态下低压配电网关键设备的损耗。

4 附加损耗的仿真验证

在仿真软件Matlab中建立了简单仿真模型，验证上文附加损耗推导的正确性。通过分析谐波、三相不平衡同时存在时关键设备附加损耗与两者单独存在时附加损耗的仿真数据，发现两种电能质量扰动共同存在时低压配电网中关键设备的附加损耗不满足叠加原理。

4.1 三相不平衡时附加损耗的仿真验证

低压配电网简单模型如图3所示。图3中，Z_{T}为变压器折算到低压侧的等效阻抗；Z_{L}为线路的等效阻抗。这样可以直观地分析电能质量问题与设备附加损耗之间的关系。设定系统中三相阻抗相同，且中性线电阻等于线路的电阻。负荷为3个单相负荷且功率因数均为0.9，在保证总负荷不变的情况下，逐渐调节负荷在三相间的分配比例，从而得到不同不平衡度下的关键设备附加损耗。

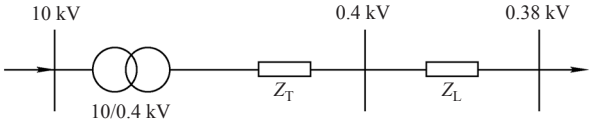


图3 低压配电网等效模型

在Matlab中搭建仿真模型如图4所示，调整谐波电流源保证系统中没有谐波电流注入，根据负荷轻重的不同，可将三相不平衡分成三种情况：①A相重载，B、C相轻载；②A、B相重载，C相轻载；③A相重载C相轻载，B相为平均负荷。由于三相不平衡主要影响低压配电网的铜耗，对变压器的空载损耗影响较小，此处仅对附加铜耗进行分析，表1为三相负荷的分布情况，表2、表3分别为上述三种负荷分布情况下仿真模型中关键设备附加损耗的仿真数据和理论计算数据。

表2、表3中，ΔP_{T}为变压器附加损耗的仿真数据；$\Delta P'_{\mathrm{T}}$为理论计算值； ΔP_{Lall}为配电线路附加损

表1 A、B、C三相负荷分布情况

（单位：kV·A）

相线	三相平衡	情况1	情况2	情况3
A	20	30	25	30
B	20	15	25	20
C	20	15	10	10

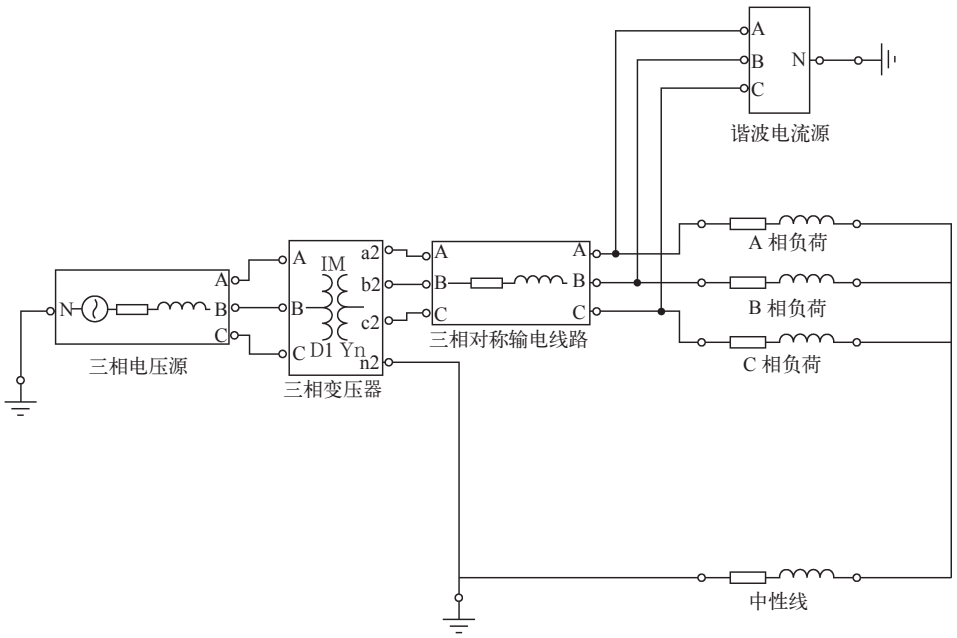


图4　低压配电网仿真模型

表2　三相负荷不平衡时的仿真数据　（单位：W）

负荷分布情况	ΔP_{T}	ΔP_{Lall}	ΔP_{0}	ΔP_{All}
情况1	0.79	36.9	153.76	191.45
情况2	1.43	68.4	171.35	241.18
情况3	1.43	67.7	221.71	290.84

表3　三相负荷不平衡时的计算数据

负荷分布情况	$\Delta P'_{T}$/W	$\Delta P'_{Lall}$/W	$\Delta P'_{0}$/W	$\Delta P'_{All}$/W	γ(%)
情况1	0.71	35.23	150.9	186.84	−2.41
情况2	1.32	65.74	167.13	234.19	−2.90
情况3	1.37	68.70	222.81	292.88	0.70

耗的仿真数据；$\Delta P'_{Lall}$为理论计算值；ΔP_{0}为中性线附加损耗的仿真数据；$\Delta P'_{0}$为理论计算值；ΔP_{All}为变压器及线路的总附加损耗的仿真数据；$\Delta P'_{All}$为理论计算值；γ为低压配电网关键设备总附加损耗的相对误差。根据表2可以得到，在上述的三种情况下，A相重载、C相轻载及B相为平均负荷时关键设备的总附加损耗是最大的。对比分析表2和表3的数据可以看出，理论推导与仿真数据的绝对误差保证在3%以内，验证了理论推导的正确性。

在负荷总量不变的情况下，调整负荷在三相间的分配，得到三种负荷分布情况下最大电流不平衡度与关键设备损耗增量比之间的关系。图5为关键设备的损耗增量比δ随着最大电流不平衡度变化而变化的关系变化曲线。其中横轴为关键设备中的最大电流不平衡度，纵轴为关键设备在三相不平衡时的损耗增比δ。

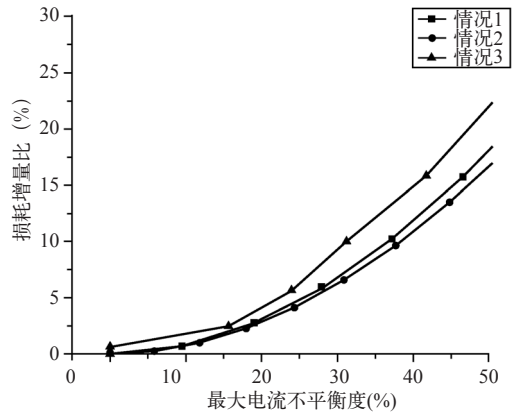


图5　关键设备附加损耗与最大电流不平衡度关系变化曲线

由图5可以看出，损耗增量比会随着最大电流不平衡度的增加而增加，且增加的比例与最大电流不平衡度的二次方成正比。在最大电流不平衡度相同时，A、B相重载，C相轻载与A相重载和B、C相轻载这两种情况的损耗增量比差别不大，而A相重载、C相轻载及B相为平均负荷时损耗增量比曲线明显高于另外两种情况。这表明，A相重载、C相轻载及B相为平均负荷这种情况下，三相不平衡引起的低压配电网关键设备的附加损耗是最严重的。

4.2 谐波存在时附加损耗的仿真验证

针对上述所建的仿真系统，设定系统中3个单相负荷均为20 kV·A，保证系统处于三相平衡状态，控制谐波电流源依次注入3次、5次、7次和9次谐波电流，并通过调整各次谐波电流的注入幅值来改变谐波含有率，记录下不同谐波含有率下关键设备的附加损耗，从而得到关键设备损耗增量比与各次谐波含有率之间的关系曲线如图6所示。图6中，横轴为单次谐波含有率，纵轴为对应的损耗增量比。

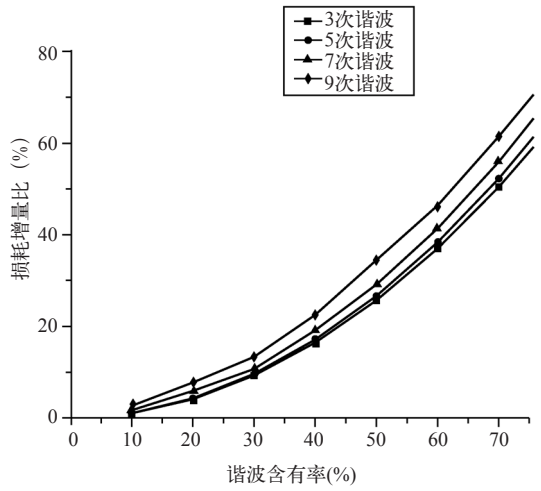


图6 关键设备附加损耗与谐波含有量关系变化曲线

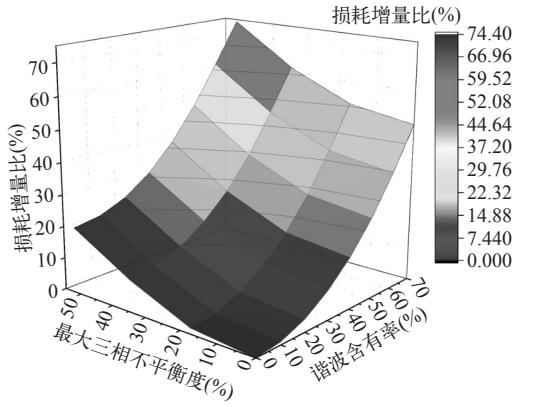
由图6可以看出，谐波产生的附加损耗随着谐波含有率的增加而变大，当谐波含有率相同时，高次谐波造成的附加损耗大于低次谐波造成的附加损耗。其主要原因在于随着谐波次数的增加，趋肤效应越来越明显，导致高次谐波阻抗大于低次谐波阻抗。而且高次谐波所占比重越大，其附加损耗也就越大。虽然该比例较小，但由于电网损耗的基数巨大，因此每年因谐波导致的附加损耗也是相当可观的。

4.3 三相不平衡及谐波同时存在时附加损耗的仿真验证

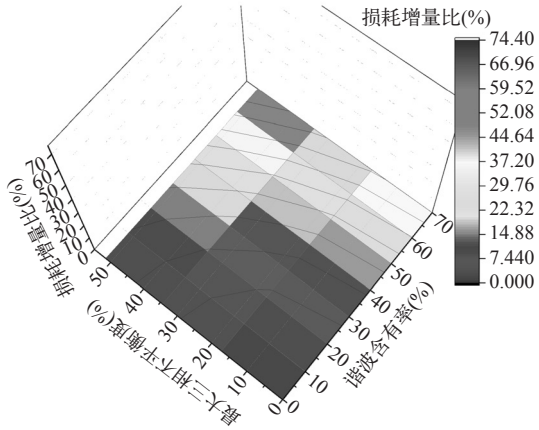
为了研究谐波及三相不平衡同时存在时线路及变压器的附加损耗，要保证系统中同时存在这两种电能质量问题，即通过调节三相负荷分布以及谐波电流源的谐波电流注入幅值来改变三相电流不平衡度与谐波电流含有率。与之前所用方式类似，同样引用损耗增量比作为量化数据，来分析附加损耗与谐波和三相不平衡指标的量化关系。

根据上述分析可知，谐波次数不同、谐波电流含有率相同时所产生的附加损耗不同，且差异较大。因此本节只考虑3次谐波作用下A相重载、C相轻载及B相为平均负荷时（最严重的三相不平衡情况）的附加损耗，并着重分析两种电能质量同时存在时的附加损耗与各自单独存在时产生的附加损耗的关系。

最大三相不平衡度、谐波含有率与损耗增量比的关系曲面如图7所示。色条与损耗增比相对应，因此从图7a可以看出，随着3次谐波含有率的增加以及最大三相不平衡度的增加，低压配电网中关键设备的附加损耗急剧增加。通过色条对比可以分析出最大三相不平衡度和谐波含有率对附加损耗的影响程度。根据图7b的俯视图可以看出，谐波含有率对附加损耗的影响程度更大。



（a）三维图



（b）俯视图

图7 附加损耗随谐波含有率与三相不平衡度变化的关系曲面图

表4为谐波及三相不平衡同时存在时线路及变压器附加损耗的仿真数据与两者单独作用时附加损耗数据的对比。其中，ΔP为3次谐波和三相不平衡同时存在时的附加损耗；$\Delta P'$为3次谐波单独作用下附加损耗与三相不平衡单独作用下附加损耗的和。

表4 复合扰动与单一扰动下附加损耗的数据对比

（a）当β_{max}=7.76时的附加损耗

B相谐波含有率（%）	ΔP/W	$\Delta P'$/W	$\Delta P'-\Delta P$/W
10	31.98	32.13	0.15
30	197.91	201.03	3.12
50	529.75	537.54	7.79
70	1 027.52	1 042.03	14.51

（b）当β_{max}=31.56时的附加损耗

B相谐波含有率（%）	ΔP/W	$\Delta P'$/W	$\Delta P'-\Delta P$/W
10	203.84	203.95	0.11
30	370.06	372.85	2.79
50	702.51	709.36	6.85
70	1 201.19	1 213.85	12.66

（c）当β_{max}=51.5时的附加损耗

B相谐波含有率（%）	ΔP/W	$\Delta P'$/W	$\Delta P'-\Delta P$/W
10	443.08	443.14	0.06
30	609.7	612.04	2.34
50	942.97	948.55	5.58
70	1 442.87	1 453.04	10.17

（d）当β_{max}=62.05时的附加损耗

B相谐波含有率（%）	ΔP/W	$\Delta P'$/W	$\Delta P'-\Delta P$/W
10	604.99	605.02	0.03
30	771.89	773.92	2.03
50	1 105.68	1 110.43	4.75
70	1 606.37	1 614.92	8.55

（e）当β_{max}=73.5时的附加损耗

B相谐波含有率（%）	ΔP/W	$\Delta P'$/W	$\Delta P'-\Delta P$/W
10	798.22	798.26	−0.01
30	965.48	967.16	1.68
50	1 299.89	1 303.67	3.78
70	1 801.5	1 808.16	6.65

通过分析表4中的数据可以得到以下结论：①当最大三相不平衡度不变时，仿真数据和理论计算数据的误差随着3次谐波含量的增加而增大；②当谐波含有率不变时，随着最大三相不平衡度的增大，误差逐渐变小；③三相不平衡和谐波同时作用于线路和变压器时所引起的附加损耗小于两者单独存在时引起的附加损耗的和，即表明两种电能质量同时存在时，低压配电网关键设备的附加损耗计算并不满足叠加定理。

5 结束语

本文就谐波和三相不平衡问题对低压配电网关键设备的附加损耗进行了理论推导，不仅得到了谐波、三相不平衡单独作用于关键设备时的附加损耗，而且得到了两种电能质量扰动共同存在时关键设备的附加损耗。通过对比仿真数据与计算数据验证了理论推导的正确性。以此为基础，验证了3次谐波及三相不平衡同时存在时低压配电网关键设备的附加损耗不满足叠加定理，当两者同时存在时造成的附加损耗要小于两者单独作用时附加损耗的和，并且当谐波含有率越大、最大三相不平衡度越小时，越难以满足叠加原理。

随着节能降耗政策的推进，复合电能质量引起的低压配电网附加损耗的准确计算以及复合电能质量扰动与关键设备附加损耗内在关联性的确定具有重要现实意义。因此笔者将进一步定量分析多次谐波与三相不平衡扰动共同作用下低压配电网关键设备附加损耗与各单一电能质量指标之间的关联性，为配电网节能降耗奠定理论基础。

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] 孙岩，林声宏，刘明波，等．中压配电网最佳供电能力分析[J]．南方电网技术，2014，8(1)：80-84．

[4] 肖助力，龚仁喜，陈双基，等．基于改进S变换的电力系统谐波检测方法[J]．电力系统保护与控制，2015，43(3)：84-89．

[5] 江政．配电变压器三相不平衡的检测与分析[D]．

郑州：郑州大学，2017.

[6] M Jawad Ghorbani，Hossein Mokhtari．Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems[J]．International Journal of Electrical and Computer Engineering，2015，7(1)：166-174.

[7] 蒋浩，王森．三相不平衡对低压网损的影响分析[J]．供用电，2008，25(3)：68-70

[8] 何延辉．配电变压器三相负荷不平衡对线损率的影响[J]．电子制作，2015(1)：268.

[9] 房雪涛．配电网三相不平衡负载的无功补偿技术研究[D]．南京：东南大学，2015.

[10] 胡应宏，王建赜，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.

[11] 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.

[12] 冯成，徐长宝．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(7)：47-51.

[13] 师会谭，计及电能质量问题的低压配电网损耗计算模型研究[D]．郑州：郑州大学，2017.

[14] 闫志强，雷霞，何建平，等．三相不平衡对配电变压器损耗影响的研究[J]．电测与仪表，2017，54(16)：43-49

[15] GB/T 15543—2008 电能质量三相电压不平衡[S]．北京：中国标准出版社，2008.

[16] 闫志强，雷霞，何建平，等．三相不平衡对配电变压器损耗影响的研究[J]．电测与仪表，2017，54(16)：44-46.

[17] GB/T 14549—1993 电能质量公用电网谐波[S]．北京：中国标准出版社，1993.

[18] 巩翔宇．含分布式电源的配电网谐波潮流计算分析[D]．郑州：郑州大学，2015

[19] Mei S，Ismail Y I．Modeling skin effect with reduced decoupled R-L circuits[C]．International Symposium on Circuits and Systems，2003：588-591.

[10] 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]．Conference of the IEEE Industrial Electronics Society，IEEE，2009：4073-4079.

[11] Tofoli F L，Sanhueza S M R，De Oliveira 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：2018－08－14)EA

专业专注

时刻关注并推动中国电气技术的发展

《电气应用》是一本拥有光荣发展历程的全国优秀科技期刊。自1982年创刊至今，已走过三十多年艰苦创业、改革发展的光辉历程。其所荣获的“全国优秀期刊、中国期刊方阵‘双奖期刊’和国家期刊奖‘百种重点期刊’、中文核心期刊”等诸多荣誉见证了编辑们的专业与勤奋，也博得了广大读者和业内专家的支持与厚爱，在众多电工类专业技术期刊中颇具影响力。