

考虑负荷不平衡分布的低压配电网线损实用计算策略

刘科研¹,贾东梨¹,王薇嘉²,耿光飞²,魏琛豪²

(1. 中国电力科学研究院有限公司,北京 100192;2. 中国农业大学 信息与电气工程学院,北京 100083)

Practical calculation strategy for low-voltage network line loss considering unbalanced load distribution

LIU Keyan¹, JIA Dongli¹, WANG Weijia², GENG Guangfei², WEI Chenhao²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. College of Information and Electrical Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

摘要:低压台区线制特殊,单相负荷与三相负荷混合,三相不平衡情况普遍且严重,引起较为严重的不平衡附加线损。各相负荷大小、空间分布的不同使低压台区内不平衡情况差异较大,对线损的影响不容忽视。为了提高低压台区线损计算的准确度,基于前推法构建考虑三相负荷不平衡分布的线损计算模型,并提出考虑负荷分布的不平衡修正系数表征三相不同分布对线损的影响。为了便于应用,以4种典型负荷分布为基础,将模型进行等效简化,提出适用于两类典型负荷分布场景的,考虑三相负荷不平衡分布的线损计算方法。算例验证了所提方法的准确性与可行性,能够为提高低压台区线损计算准确度提供参考依据。

关键词:低压配电台区;三相不平衡;负荷分布;线路损耗

Abstract: The single-phase load and the three-phase load in the low-voltage station area are mixed and the wiring system is special. The three-phase unbalance is common and serious, causing more serious unbalanced additional line loss. The difference in the load size and spatial distribution of each phase causes the imbalance in the low-voltage station area to be great different, and the impact on the unbalanced line loss cannot be ignored. In order to improve the accuracy of the line loss calculation in the low-voltage station area, a three-phase unbalanced line loss calculation model that considers the load distribution based on the forward method is constructed, and an unbalanced correction coefficient considering the load distribution to characterize the effect of the three-phase distribution on the line loss is proposed. In order to facilitate the application, based on the four typical load distributions, the model is equivalently simplified, and a three-phase unbalanced line loss calculation method that is suitable for two types of typical load distribution scenarios and considering the load distribution is proposed. The calculation example verifies the accuracy and feasibility of the method, and can provide a reference for improving the accuracy of line loss calculation in the low-voltage station area.

Key words: low-voltage distribution area; three-phase unbalance; load distribution; line loss

0 引言

低压配电网线制复杂,三相不平衡情况普遍存在^[1]。三相不平衡会引起三相电压和电流不对称,而且使中性线上产生电流,进一步加大了线路损耗^[2-4]。

低压配电线路结构多为辐射状分布,同等大小的负荷,距离变压器二次侧越远,造成的损耗越大;不平衡程度相同的三相负荷组合,距离变压器二次侧越远,造成的损耗越大^[5]。因此,在计算三相四线制的低压配电网线损时,应该同时考虑负荷分布与三相不平衡。

目前,低压配电网易获取的数据还不足以进行大规模的潮流计算或者智能算法计算,因此电力行业标准 DL/T 686-2018《电力网电能损耗计算导则》^[6]中要求,0.4 kV 低压电力网的电能损耗计算宜采用等值电阻法、分相等值电阻法和台区损失率法。该方法对数据的类型和数量要求较低,但存在假设条件多,考虑因素不充分,结果误差较大等问题。文献[7-9]对传统线损计算方法的模型和适用范围进行了介绍。文献[10]以负荷用电量为数据对等值电阻法进行了改进,考虑了三相不平衡因素。文献[11]忽略沿线电压降落时,可以由基尔霍夫电流定律和对称分量法得到每条线段电流,计算三相不平衡时的线损。文献[12]在复功率相同的情况下比较平衡与不平衡时的线路损耗,以变压

收稿日期:2021-06-30;修回日期:2021-09-12

基金项目:国家电网有限公司科技项目(SGTJDK00DWJS1800014)

器出口侧不平衡度计算线路总不平衡损耗。这些方法考虑了三相不平衡对线损的影响,较之传统计算方法精确度得到了一定的提升,但对不平衡程度与线损的定量关系不明确,以线路首端不平衡度衡量整个台区的不平衡情况,忽略了负荷分布不平衡对线损的影响,存在理论误差。

文献[13]定性分析了负荷、线路参数和分布式电源(distributed generation, DG)接入对不平衡度的影响,但没有更进一步,研究多种因素通过影响不平衡度对线损的影响。文献[14]分析了接入DG产生的负荷空间分布变化对线损的影响;文献[15]考虑动态三相不平衡度,以线路结构为基础,计算损耗在各支路的分布情况;上述文献考虑了多种线损影响因素,但没有就负荷空间分布的不平衡与线损之间的相关性进行分析。

本文提出一种考虑负荷分布不平衡的线损计算方法。以易获取的有功电量数据为基础,基于前推法构建考虑负荷分布不平衡的线损计算模型和考虑负荷分布的不平衡修正系数模型,量化负荷分布与线损的相关性;通过理论分析和数学推导将模型进行等效简化,提出一种考虑负荷分布的线损计算方法。最后,通过算例验证本文所提方法的合理性。

1 考虑三相不平衡的低压配网线损计算

1.1 三相负荷不平衡对低压配电网线损的影响

低压配电网三相不平衡主要由三相负荷不平衡引起,因此本文主要研究三相负荷不平衡对低压配电网线损的影响。平衡时的线路损耗 ΔA_L 如下

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

式中: I 为相电流; R 为线路电阻; t 为运行时间。

三相不平衡时的线路损耗 $\Delta A'_L$ 如下

$$\Delta A'_L = (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) R t + I_N^2 R_N t \quad (2)$$

式中: I_a 、 I_b 、 I_c 分别为变压器二次侧 A、B、C 相电流; I_N 为中性线电流。

实际电力系统量测中往往不采集中性线电流,为计算不平衡时的线路损耗,假定三相负荷不等时三相电压仍处于平衡状态,以 ΔA_L 为基础对 $\Delta A'_L$ 进行估算,如下所示

$$\Delta A'_L = \eta \times \Delta A_L \quad (3)$$

式中: η 为三相不平衡时的线损修正系数。此时三相总负荷相等,平衡与不平衡两种状态下相电流间关系如下所示

$$I = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (4)$$

以式(4)为基础可以确定 η , 进而得到 $\Delta A'_L$ 。

1.2 三相不平衡时的线损计算模型

三相不平衡度定义如下所示

$$\varepsilon_\phi = \frac{I_\phi - I_{av}}{I_{av}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: ε_ϕ 为 ϕ 相不平衡度, $\phi \in \{a, b, c\}$; I_ϕ 为 ϕ 相负荷电流; $I_{av} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)$ 为三相平均电流。

由式(5)可知, $I_\phi = (1 + \varepsilon_\phi) I_{av}$ 。 I_ϕ 的取值范围为 $[0, 3I_{av}]$, 所以 ε_ϕ 的变化范围是 $[-1, 2]$, 且存在等式约束如下所示

$$\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c = 0 \quad (6)$$

在三相不平衡的情况下,相线上产生的损耗如下所示

$$\begin{aligned} \Delta A_{L_1} &= [(1 + \varepsilon_a)^2 + (1 + \varepsilon_b)^2 + (1 + \varepsilon_c)^2] I_{av}^2 \times R t \\ &= (3 + \varepsilon_a^2 + \varepsilon_b^2 + \varepsilon_c^2) I_{av}^2 \times R t \end{aligned} \quad (7)$$

三相负荷不平衡不仅造成各相电流幅值不等,也会使电流相角不对称。以极端情况为例:若三相负载分别为阻抗大小相同的纯电阻、纯电感、纯电容性负载,此时三相最大相角差为 150° , 实际负荷功率因数差距远小于极端情况,因此由负荷不平衡导致的电流相角不对称程度较低,对线损影响较小。在简化计算中可以假设三相电流相角差仍为 120° , 可得中性线电流如下所示

$$\dot{I}_N = (1 + \varepsilon_a) I_{av} + a^2 (1 + \varepsilon_b) I_{av} + a (1 + \varepsilon_c) I_{av} \quad (8)$$

式中: $a = e^{j120^\circ}$, $a^2 = e^{j240^\circ}$ 。

中性线上产生的损耗如下所示

$$\begin{aligned} \Delta A_{L_N} &= I_N^2 \times R_N t \\ &= [\varepsilon_a^2 + \varepsilon_b^2 + \varepsilon_c^2 - (\varepsilon_a \varepsilon_b + \varepsilon_c \varepsilon_a + \varepsilon_b \varepsilon_c)] I_{av}^2 \times R_N t \end{aligned} \quad (9)$$

三相不平衡时低压线路总损耗如下所示

$$\begin{aligned} \Delta A'_L &= \Delta A_{L_1} + \Delta A_{L_N} \\ &= [3 + (\varepsilon_a^2 + \varepsilon_b^2 + \varepsilon_c^2) + \frac{R_N}{R} [(\varepsilon_a^2 + \varepsilon_b^2 + \varepsilon_c^2) - (\varepsilon_a \varepsilon_b + \varepsilon_b \varepsilon_c + \varepsilon_c \varepsilon_a)]] I_{av}^2 R t \end{aligned} \quad (10)$$

三相不平衡的线损修正系数模型如下所示

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\Delta A'_L}{\Delta A_L} = 1 + \frac{(\varepsilon_a^2 + \varepsilon_b^2 + \varepsilon_c^2) + \frac{R_N}{R} [(\varepsilon_a^2 + \varepsilon_b^2 + \varepsilon_c^2) - (\varepsilon_a \varepsilon_b + \varepsilon_b \varepsilon_c + \varepsilon_c \varepsilon_a)]}{3} \end{aligned} \quad (11)$$

将公式(6)代入式(11)可得

$$\eta = 1 + \left(\frac{2}{3} + \frac{R_N}{R} \right) (\varepsilon_a^2 + \varepsilon_b^2 + \varepsilon_a \varepsilon_b) \quad (12)$$

将 $R_N = R$ 与 $R_N = 2R$ 分别代入式(12)可得

$$\eta = 1 + \frac{5}{3} (\varepsilon_a^2 + \varepsilon_b^2 + \varepsilon_a \varepsilon_b) \quad (13)$$

$$\eta = 1 + \frac{8}{3}(\varepsilon_a^2 + \varepsilon_b^2 + \varepsilon_a \varepsilon_b) \quad (14)$$

因此,当中性线线径与相线相等或为相线 1/2 时,负荷集中在某一相的线损分别为平衡时的 6 倍和 9 倍。

2 考虑负荷分布的平衡态线损计算

目前低压台区线损相关数据的数据质量不高,因此本文以各负荷点电量数据为基础进行分析计算,此数据可信度较高,且不需要增加采集成本。

2.1 集中负荷下的平衡态线损计算模型

配电线路承载集中负荷时线路电流如下所示

$$I = \frac{A_{PL}}{\sqrt{3}U_N \cos \varphi t} \quad (15)$$

式中: A_{PL} 为三相负荷总有功用电量; U_N 为额定线电压; $\cos \varphi$ 为负荷功率因数。

集中负荷三相平衡时线路损耗如下所示

$$\Delta A_L = 3I^2 R t = \frac{A_{PL}^2 L r_0}{U_N^2 \cos^2 \varphi t} \quad (16)$$

式中: L 为线路的长度; r_0 为单位长度的导线电阻。

2.2 考虑负荷分布的平衡态线损计算模型

低压配电线路运行时网络结构一般如图 1 所示。

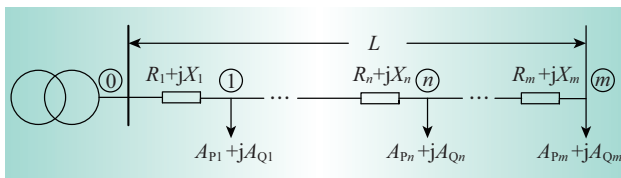


图 1 低压线路负荷分布等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of low voltage line load distribution

设其共有 m 个负荷接入点,图 2 中,节点 0 代表配电母线, $R_n + jX_n$ 代表第 n 段馈线的等值阻抗, $A_{pn} + jA_{qn}$ 代表第 n 个节点的负荷用电量, $n = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ 。将配电网电压近似为额定电压 U_N 。

当有多个用电负荷接至线路时,若忽略各负荷点之间的电压降落和功率因数的不同。可由前推法,求得线路有功损耗 ΔA_L^* 如下所示

$$\Delta A_L^* = \frac{1}{U_N^2 \cos^2 \varphi t} \sum_{n=1}^m (\sum_{i=n}^m A_{Pi})^2 R_n \quad (17)$$

式中: I_n 为线路上节点 $n-1$ 到节点 n 之间的电流; A_{Pi} 为节点 i 负荷三相有功用电量。

以末端集中分布时线损为基准,定义考虑负荷分布的线损修正系数 ξ 如下所示

$$\xi = \frac{\frac{1}{U_N^2 \cos^2 \varphi t} \sum_{n=1}^m (\sum_{i=n}^m A_{Pi})^2 R_n}{\frac{A_{PL}^2 L r_0}{U_N^2 \cos^2 \varphi t}} = \frac{\sum_{n=1}^m (\sum_{i=n}^m A_{Pi})^2 R_n}{A_{PL}^2 L} \quad (18)$$

设馈线上负荷有功用电量沿馈线长度 x 的分布函数为 $A_P(x)$ 。当馈线上所带负荷节点数 m 趋近于无穷时,可将式(17)中的求和公式进一步用积分形式表示如下

$$\Delta A_L^* = \frac{1}{U_N^2 \cos^2 \varphi t} \left[\int_0^L \left(\int_y^L A_P(x) dx \right)^2 dy \right] r_0 \quad (19)$$

2.3 4 种典型负荷分布的线损计算模型

负荷有功用电量沿线分布模式多样,列出 4 种典型分布进行分析,包括:末端集中分布、均匀分布、递减分布、递增分布。4 种分布函数 $A_P(x)$ 及相应曲线如图 2 所示,以线路首端作为横坐标的原点。

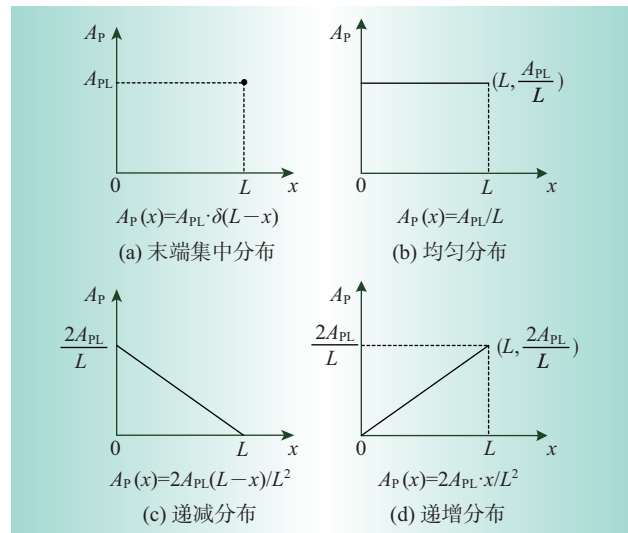


图 2 典型连续负荷分布

Fig. 2 Typical continuous load distribution

分别将 4 种典型分布的分布函数代入式(19)中,可推导出 4 种典型负荷分布的线损计算模型。

不同情况的分布函数与线损修正系数见表 1。

表 1 不同负荷情况的线损修正系数

Table 1 Line loss correction coefficient for different load conditions

修正系数	负荷分布			
	末端集中	连续均匀	连续递减	连续递增
ξ	1	1/3	1/5	8/15

实际线路负荷点有限,负荷分布为离散点分布,因此与表中数值相比存在一定误差。设实际负荷数为 M , ξ 随 M 的增大而减小, $M=10$ 时各种情况的最大误差约 5%。

负荷数大于 10 的负荷离散分布与连续分布的修正系数误差约为 5%,因此,在可获取数据有限或对计算精度要求不高时,负荷离散分布可以近似等价于负荷连续分布,方便进行后续分析计算。

3 考虑负荷分布三相不平衡的线损分析

由于单相负荷的存在和各相负荷空间分布的不同,存在线路首端三相接近平衡,但沿线三相不平衡程度较高的情况。因此,三相不平衡与负荷分布对线损的影响存在相关性。本文在目前可利用数据源的基础上定量分析负荷分布,建立一种考虑负荷分布三相不平衡的线损计算模型;设定与实际情况较为匹配的两类场景(首端平衡并考虑负荷分布、首端不平衡但三相负荷同分布)对模型进行简化分析,提出适用于常见场景的线损计算方法,提高方法的适用性。

3.1 考虑负荷不平衡分布的线损计算模型

若忽略各负荷点之间的电压降落、功率因数的不同和不平衡造成的中性点电压位移,由单相有功用电量求解单相电流如下所示

$$I_{\phi n} = \frac{\sum_{i=n}^m A_{\phi bi}}{(U_N / \sqrt{3}) \cos \varphi t} \quad (20)$$

式中: $I_{\phi n}$ 为 ϕ 相的节点 $n-1$ 到节点 n 之间的电流,当 $n=1$ 时为母线到节点 1 的电流; $A_{\phi bi}$ 为 ϕ 相节点 i 负荷有功用电量。

将式(20)代入式(5)、式(12),可得各负荷点三相不平衡系数模型,如式(21)所示

$$\begin{aligned} \eta_n &= 1 + \left(\frac{2}{3} + \frac{R_N}{R}\right) \times (\varepsilon_{an}^2 + \varepsilon_{bn}^2 + \varepsilon_{cn}^2) \\ &= 1 + \left(\frac{2}{3} + \frac{R_N}{R}\right) \times \left(\frac{\left(\sum_{i=n}^m A_{\text{Pai}}\right)^2 + \left(\sum_{i=n}^m A_{\text{Pbi}}\right)^2 + \sum_{i=n}^m A_{\text{Pai}} \sum_{i=n}^m A_{\text{Pbi}}}{\left(\sum_{i=n}^m A_{\text{Pavi}}\right)^2} - \right. \\ &\quad \left. \frac{3 \sum_{i=n}^m A_{\text{Pai}} + 3 \sum_{i=n}^m A_{\text{Pbi}} - 3 \sum_{i=n}^m A_{\text{Pavi}}}{\sum_{i=n}^m A_{\text{Pai}}} \right) \times 100\% \end{aligned} \quad (21)$$

式中: η_n 为第 n 个节点的三相不平衡修正系数; A_{Pai} 、 A_{Pbi} 、 A_{Pci} 分别为第 i 个节点接入负荷的 A、B、C 相有功用电量; $A_{\text{Pavi}} = \frac{1}{3}(A_{\text{Pai}} + A_{\text{Pbi}} + A_{\text{Pci}})$ 为第 i 个节点所接入负荷的三相平均有功用电量。

因此,将式(21)代入式(17)可得考虑负荷不平衡分布的线损 ΔA_L^w 如下所示

$$\Delta A_L^w = \frac{9}{U_N^2 \cos^2 \varphi t} \sum_{n=1}^m \eta_n \times \left(\sum_{i=n}^m A_{\text{Pavi}}\right)^2 R_n \quad (22)$$

现假设三相负荷用电量沿线路的分布可分别表示为函数 $A_{\text{Pa}}(x)$ 、 $A_{\text{Pb}}(x)$ 、 $A_{\text{Pc}}(x)$ 。当馈线上所带负荷节点数 m

趋近于无穷时,可设 $\theta_a(x) = \int_y^L A_{\text{Pa}}(x) dx$, $\theta_b(x) = \int_y^L A_{\text{Pb}}(x) dx$, $\theta_c(x) = \int_y^L A_{\text{Pc}}(x) dx$, $\theta_{\text{av}}(x) = \int_y^L A_{\text{Pav}}(x) dx$, 可将式(22)中的求和公式进一步用积分形式表示为

$$\Delta A_L^w = \frac{9r_0}{U_N^2 \cos^2 \varphi t} \int_0^L \left\{ \theta_{\text{av}}^2(x) + \left(\frac{2}{3} + \frac{R_N}{R}\right) [\theta_a^2(x) + \theta_b^2(x) + \theta_a(x)\theta_b(x) - 3\theta_a(x)\theta_{\text{av}}(x) - 3\theta_b(x)\theta_{\text{av}}(x) + 3\theta_{\text{av}}^2(x)] \right\} dy \quad (23)$$

式(23)为负荷近似连续分布条件下的三相负荷不平衡分布的线损模型。以三相平衡且均为末端集中分布时的线损为基准,定义考虑负荷不平衡分布的线损修正系数 ω 如下所示

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{\frac{9}{U_N^2 \cos^2 \varphi t} \left[\int_0^L \eta(x) \left(\int_y^L A_{\text{Pav}}(x) dx \right)^2 dy \right] r_0}{\frac{A_{\text{PL}}^2 L r_0}{U_N^2 \cos^2 \varphi t}} \\ &= \frac{9}{A_{\text{PL}}^2 L} \int_0^L \left\{ \theta_{\text{av}}^2(x) + \left(\frac{2}{3} + \frac{R_N}{R}\right) [\theta_a^2(x) + \theta_b^2(x) + \theta_a(x)\theta_b(x) - 3\theta_a(x)\theta_{\text{av}}(x) - 3\theta_b(x)\theta_{\text{av}}(x) + 3\theta_{\text{av}}^2(x)] \right\} dy \end{aligned} \quad (24)$$

式(24)定义的 ω 修正了两部分损耗:考虑负荷分布的线损及三相不平衡附加损耗。

3.2 首端平衡负荷不平衡分布的线损估算方法

在电网规划与运行中,为了降低损耗,总是尽可能使低压线路首端实现三相平衡,因此定量分析此类情况下负荷分布对线损的影响具有重要实际意义。本节以 4 种典型分布为基础,推导出 16 种首端平衡而各相负荷不同分布时的线损修正系数,进而给出此类场景的线损估算方法。设馈线上各相负荷首端总有功用电量为 A_{Pa} 、 A_{Pb} 、 A_{Pc} , $A_{\text{Pa}} = A_{\text{Pb}} = A_{\text{Pc}} = A_{\text{PL}}/3$, 中性线线径为相线的 1/2, 即 $R_N = 2R$ 。

以 A 相为末端集中分布, B 相为均匀分布, C 相为递增分布为例进行分析。

三相负荷分布函数,如下所示

$$\begin{cases} A_{\text{Pa}}(x) = \frac{A_{\text{PL}} \delta(L-x)}{3} \\ A_{\text{Pb}}(x) = \frac{A_{\text{PL}}}{3L} \\ A_{\text{Pc}}(x) = \frac{2A_{\text{PL}} \cdot x}{3L^2} \end{cases} \quad (25)$$

将式(25)代入式(23),可得该三相分布的三相不平衡线路损耗如下所示

$$\Delta A_L^w = \frac{73A_{\text{PL}}^2 L r_0}{90U_N^2 \cos^2 \varphi t} \quad (26)$$

此时,线损修正系数 $\omega = \frac{73}{90} \approx 0.82$ 。

由 4 种典型分布构成的三相分布不完全相同的情况有 16 种,三相同分布有 4 种。此 20 种分布的线损修正系数 ω 及其估算值 ω' , 如表 2 所示。

表2 考虑负荷不平衡分布的线损修正系数
Table 2 Correction coefficients of line loss considering unbalanced load distribution

A相分布	B相分布	C相分布	ω	ω'
末端集中	末端集中	末端集中	1.00	1.00
		均匀	1.00	
		递增	0.98	
		递减	1.09	
末端集中	均匀	均匀	0.78	0.82
		递增	0.81	
		递减	0.81	
	递增	递增	0.82	
		递减	0.86	
	递减	递减	0.82	
均匀	均匀	均匀	0.33	0.30
		递减	0.31	
	递减	递减	0.27	
递增	均匀	均匀	0.42	0.41
		递减	0.42	
	递减	递减	0.40	
递增	递增	均匀	0.49	0.51
		递增	0.53	
		递减	0.51	
递减	递减	递减	0.20	0.20

注： ω 由式(24)求得， ω' 为将分布情况分为6类后的估算值。

由表1可以看出，上述20种负荷分布情况按 ω 大小可大致分为6类。

3.3 首端不平衡但三相负荷同分布时的线损估算方法

当首端三相总负荷不等时，式(23)依然成立。若三相负荷同分布，则每个负荷点三相不平衡修正系数相同，此时的线损计算如下

$$\Delta A_L = \frac{9r_0\eta}{U_N^2 \cos^2 \varphi t} [\int_0^L \eta(x) (\int_y^L A_{pav}(x) dx) dy] \quad (27)$$

此时，考虑负荷分布得线损修正系数如下

$$\omega = \frac{\frac{9r_0\eta}{U_N^2 \cos^2 \varphi t} [\int_0^L (\int_y^L A_{pav}(x) dx) dy]}{\frac{A_{PL}^2 L r_0}{U_N^2 \cos^2 \varphi t}} = \eta \times \xi \quad (28)$$

由式(28)可知，首端不平衡但三相同分布的线损修正系数 ω 为首端三相不平衡修正系数 η 与负荷分布修正系数 ξ 的乘积。

将表1中的修正系数 ξ 代入式(28)可得首端不平衡三相同分布时的线损修正系数 ω ，如表3所示。

表3 首端不平衡负荷同分布的线损修正系数
Table 3 Correction coefficients of line loss of same distribution at head-end imbalance

负荷分布形式	损耗修正系数 ω
末端集中分布	η
均匀分布	$\eta/3$
递增分布	$8\eta/15$
递减分布	$\eta/5$

4 结束语

本文以较易获取的有功电量为数据源，提出一种考虑负荷分布的低压台区三相负荷不平衡分布线损计算方法。首先，建立负荷集中分布的三相负荷不平衡分布线损修正系数模型，通过前推法，建立负荷三相平衡、同分布的理论线损计算模型，进而提出一般情况下考虑三相负荷不平衡分布的线损计算方法。为了便于应用，以4种典型分布为基础，通过数学推导和理论分析，提出适用于两类典型场景（首端平衡且三相不同分布、首端不平衡且三相同分布），考虑三相负荷不平衡分布的线损估算方法。算例结果表明，本文提出的方法能够在已知台区首端各相负荷用电量和负荷分布规律时较为准确地计算台区线损，提高理论线损计算精度，为不平衡治理和台区经济运行提供可靠参考依据。本文的研究主要针对负荷的不平衡分布，尚未考虑由线路长度等因素导致的三相网络不平衡，下一步工作主要针对上述不足进行研究，进一步完善不平衡情况下的线损计算策略。

参考文献：

[1] 方恒福,盛万兴,王金丽,等. 配电台区三相负荷不平衡实时在线治理方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015,35(9):2 185-2 193.
FANG Hengfu, SHENG Wanxing, WANG Jinli, et al. Research on the method for real-time online control of three-phase unbalanced load in distribution area [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9):2 185-2 193.

[2] PASDAR A, MEHNE H H. Intelligent three-phase current balancing technique for single-phase load based on smart metering [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(3):693-698.

[3] 张小伟,孙金国,杜路路,等. 智能配电台区控制器的研究与设计[J]. 电器与能效管理技术,2017(5):29-36,66.
ZHANG Xiaowei, SUN Jinguo, DU Lulu, et al. Research and design of intelligent distribution area controller [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(5): 29-36, 66.

- [4] 刘崇伟. 城乡电网单相混合配电技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2009.
LIU Chongwei. Research on single-phase and three-phase hybrid distribution technology of urban and rural power grids[D]. Beijing:Jiaotong University, 2009.
- [5] 赵杉. 接纳大规模分布式光伏电源的农村配电网建设研究[D]. 济南:山东大学,2015.
ZHAO Shan. Research on the construction of rural distribution network that adopts large-scale distributed photovoltaic power[D]. Jinan:Shandong University, 2015.
- [6] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 电力网电能损耗计算导则:DL/T 686-2018[S]. 北京:中国电力出版社,2018.
State Economic and Trade Commission of the PRC. Guide of calculation of grid energy loss: DL/T 686-2018 [S]. Beijing:China Electric Power Press, 2018.
- [7] WALSH S T, KIRCHHOFF B A, NEWBERT S. Differentiating market strategies for disruptive technologies [J]. IEEE Transactions on Engineering Management. 2002, 49 (4):341-351.
- [8] 汪仙. 配电网经济运行与降损措施研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2018.
WANG Xian. Research on economic operation and loss reduction measures of distribution network [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.
- [9] TAN H, LI Y, YU L, et al. Estimation method of line loss rate in low voltage area based on mean shift clustering and BP neural network [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1 754(1):012 225.
- [10] 刘庭磊,王韶,张知,等. 采用负荷电量计算低压配电区理论线损的牛拉法[J]. 电力系统保护与控制, 2015,43(19):143-148.
LIU Tinglei, WANG Shao, ZHANG Zhi, et al. Newton-Raphson method for theoretical line loss calculation of low-voltage distribution transformer district by using the load electrical energy [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19):143-148.
- [11] 何文霭. 三相不平衡负荷对低压线损率的影响分析[J]. 中国高新技术企业,2016(30):127-128.
HE Wen'ai. Analysis of the influence of three-phase unbalanced load on the low-voltage line loss rate [J]. China High-Tech Enterprise, 2016(30):127-128.
- [12] 同向前,王海燕,尹军. 基于负荷功率的三相不平衡度的计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2011, 23(2):24-30.
TONG Xiangqian, WANG Haiyan, YIN Jun. Calculation method of three-phase unbalance factor based on load power [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(2):24-30.
- [13] 孙一帆. 低压配电网线损影响因素与降损策略研究[D]. 南京:东南大学,2018.
SUN Yifan. Research on influencing factors and loss reduction strategies of low voltage distribution network line loss [D]. Nanjing:Southeast University, 2018.
- [14] 刘健,黄炜. 分布式光伏电源与负荷分布接近条件下的可接入容量分析[J]. 电网技术,2015,39(2):299-306.
LIU Jian, HUANG Wei. Analysis on grid-connectable capacity of distributed PV generation in case of PV generation distribution close to load distribution [J]. Power System Technology, 2015, 39(2):299-306.
- [15] 吴佳佳,黄俊,韩旭雯. 基于实际线路结构且考虑动态三相不平衡度的低压电网线损算法[J]. 电气时代, 2015(12):76-79.
WU Jiajia, HUANG Jun, HAN Xuwen. A low-voltage power grid line loss algorithm based on actual line structure and considering dynamic three-phase unbalance [J]. Electrical Times, 2015(12):76-79.

作者简介:

刘科研(1978),男,河南郑州人,博士,教授级高工,研究方向为配电网建模仿真与智能分析;

贾东梨(1982),女,山东济宁人,硕士,教授级高工,研究方向为智能电网运行技术等。

(责任编辑 水 鸽)

(上接第80页)

- Optimal offering strategy of a virtual powerplant: a stochastic bi-level approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2):117-119.
- [5] 姜海洋,谭忠富,胡庆辉,等. 用户侧虚拟电厂对发电产业节能减排影响分析[J]. 中国电力,2010,43(6):37-40.
JIANG Haiyang, TAN Zhongfu, HU Qinghui, et al. Action analysis of nominal power plants on energy saving and emission controlling of power industry [J]. Electric Power, 2010, 43(6):37-40.
- [6] 王皓靖,修晓青,张宇,等. 基于遗传算法的虚拟电厂经济性分析[J]. 电器与能效管理技术,2018(6):11-17.
WANG Haojing, XIU Xiaoqing, ZHANG Yu, et al. Economic analysis of virtual power plant based on genetic algorithm [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(6):11-17.
- [7] 彭雪莹,黄博文,潘轩,等. 基于虚拟电厂及负荷聚集商的用户侧储能适应性研究[J]. 电器与能效管理技术,2020(10):21-26.
PENG Xueying, HUANG Bowen, PAN Xuan, et al. Research on user-side energy storage adaptability based on virtual power plant and load aggregator [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(10):21-26.
- [8] 潘冰,杨柳. 一种计及风光储的虚拟电厂多目标调度控制模型[J]. 电器与能效管理技术,2019(21):56-62.
PAN Bing, YANG Liu. A multi-objective scheduling control model for virtual power plant considering wind and solar energy [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(21):56-62.

(责任编辑 水 鸽)