

配电变压器三相不平衡附加损耗量化分析

郭修华

(宁波宁变电力科技股份有限公司 315040)

摘要: 由于未对铁芯损耗进行全面分析,导致计算配电网变压器三相不平衡所导致的额外损耗时,精度存在不足。鉴于目前配变能耗值需达到新国标要求,准确且高效的损耗数据对损耗管理至关重要。因此,建议使用一种新的计算方法,这种方法考虑到铁芯损耗的变动,用以计算配电变压器三相不平衡的附加损失。本文论述了三相不平衡对配电变压器损耗影响机理,分析了配电网变压器三相不平衡时损耗模型和附加损耗计算,并提出了其附加损耗影响的仿真分析,可供参考!

关键词: 配电变压器; 三相不平衡; 附加损耗; 量化计算

我国的电网规模巨大,服务于众多且类型多样的电力用户。由分布式电源的并网、大型单相负载的连续启停、不均衡的负载分布,以及单相负载工作时间的不一致性等因素引起的三相负载不平衡现象,会使得三相电压和电流的大小和相位出现不一致性。这种三相不对称情况会增大配电变压器的有效功率损失,进而不仅降低变压器的工作效率,造成经济上的损失,还可能导致变压器温度异常升高,缩短使用寿命,甚至发生过热或爆炸等严重事故。因此,对配电变压器三相不平衡额外损耗进行量化分析研究,对于正确评估变压器的损耗情况和制定有效的降损策略具有极其重要的意义。

1 三相不平衡对配电变压器损耗影响机理分析

在三相交流系统里,如果三相电压或电流的大小不一致,或它们之间的相位差异不为 120 度,或者这些偏差超出了可接受的标准,这种情况就被定义为三相不平衡。这是配电变压器遇到的一个非常普遍的电能质量问题,其不平衡的程度会直接对变压器的能耗产生影响。在传统的低压配电网中,人们往往假设变压器等电力设备的参数都能保持三相相等,负载也基本保持对称,因此不平衡的情况较少,导致的能量损失也被认为是可以忽略的。然而,随着智能电网技术的发展,特别是电力电子设备的广泛使用,造成的不对称负载日渐增多,三相不平衡的问题也变得越发显著。

针对三相负荷存在的不平衡情况,可以将其分为以下几个类型:

对于三相负载的分配存在明显的不平衡现象,其中某些相的负载始终比其它相高,这种情况下负载比例相

对固定,且一天之内其波动幅度较小。

在日间三相的工作负载消耗较多电量,电压相对稳定;但到了晚上,随着单相生活用电的需求升高,三相负荷变得不平衡。

随着季节的变化,三相负荷的平衡状况也会发生变化。在用电高峰季节,三相负载较为平衡;而在用电量较低的时期,则会出现不平衡现象。

某一相在特定时间内的负载明显比其他时间高,导致负载随时间波动,从而产生不平衡。在采用三相四线制的配电变压器运作时,一般联接组标号为 Yyn0。当三相负荷出现不平衡时,会导致三相电流总和不为零,进而产生零序电流。零序电流的大小与三相负荷不平衡的严重程度成正比,零序电流越大,其引起的零序磁通也越大。由于变压器高压绕组的中性点未接地,无法流经零序电流,零序磁通便通过变压器的其它部件形成回路。这会引发大量的磁滞和涡流损耗,导致设备温度升高、发热,从而使得变压器的运行损耗大为增加。

当配变负荷三相平衡时,每相绕组电流为 $(I_a + I_b + I_c)/3$,则三相总损耗为:

$$\Delta P_1 = 3[(I_a + I_b + I_c)/3]^2 \cdot R$$

当配变负荷三相不平衡时,三相绕组的总损耗为:

$$\Delta P_2 = (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) \cdot R$$

则三相不平衡带来的附加损耗是:

$$\Delta P = \Delta P_2 - \Delta P_1 = [(I_a - I_b)^2 + (I_b - I_c)^2 + (I_c - I_a)^2]/3 \cdot R$$

从上述表述中可以理解,当出现三相不平衡的情

况时，总会伴随着额外的损耗，并且这种损耗会随着三相负荷不均衡的程度加剧而上升。

2 配电网变压器三相不平衡时损耗模型

当三相负荷发生不平衡时，变压器的低压侧将会产生零序磁通。但是，由于变压器设计上的特性，其一次侧通常不会有零序电流流过，这意味着二次侧的零序电流缺乏一个正常的流动路径，它只能通过变压器的油箱壁和金属结构件来完成回路。相较于绕组的磁阻，变压器油箱壁和金属结构件的磁阻数值要大得多。因此，当这些金属结构件中有零序电流经过时，就会产生显著的磁滞和涡流损耗，从而导致这些金属部件发生额外的加热。

变压器的附加铁损为：

$$\Delta P_{oc} = I_{oc}^2 R_{oc}$$

三相绕组电流幅值平衡时，变压器绕组损耗可以表示为：

$$P_{T1} = 3 \times \left[(I_A + I_B + I_C) / 3 \right]^2 \times R_T$$

$$= 3 I_{av}^2 R_T$$

三相绕组电流幅值不平衡时，变压器绕组损耗可以表示为：

$$P_{T2} = (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) \times R_T$$

$$= I_{av}^2 \left[(1 + \beta_A)^2 + (1 + \beta_B)^2 + (1 + \beta_C)^2 \right] R_T$$

在进行低压配电网三相不平衡损耗计算时，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：

$$\Delta P_T = P_{T2} - P_{T1}$$

$$= I_{av}^2 \left[\beta_A^2 + \beta_B^2 + \beta_C^2 \right] R_T$$

$$= K_T I_{av}^2 R_T$$

式中：KT 代表变压器的三相不平衡度系数

上式即为配电变压器在三相电流幅值不平衡的情况下的附加损耗模型。

3 配电变压器在相角不平衡情况下附加损耗计算

三相不平衡现象既包括电流的幅值不同，也涉及到相角的不一致。但之前关于三相不平衡的损耗计算，主

要是基于电流幅值相等的情况下进行的。在实际运行的电力系统中，相角也可能会出现不对等的情况。在三相四线制的低压配电网中，尽管相角的不一致不会直接影响到各相的电流，但它会在中性线造成不平衡的电流，从而对中性线的损耗产生影响。因此，在考虑相角不对称的情况下，需要重新评估中性线的电流。即便在三相电流的幅值完全一致的情况下，由于相角的不对称，中性线上也可能存在电流，导致能量损耗。

对于配电变压器的附加损耗分析，通常来说，三相不平衡对于变压器铁损的影响较小，可以在很多情况下忽略不计。这样，变压器的附加损耗主要涉及其他方面。此时变压器的附加损耗可以表示为：

$$\Delta P_T = \left[\beta_A^2 + \beta_B^2 + \beta_C^2 \right] I_{av}^2 R_T$$

$$= K_T I_{av}^2 R_T$$

上文提到的公式描述了在三相电流的幅值和相角存在不平衡时，配电变压器额外损耗的计算模型。根据这个模型，仅当三相电流的相角出现不平衡时，对配电变压器的损耗并没有影响。

4 配电变压器三相不平衡附加损耗影响的量化计算

通过智慧采集云平台收集并分析某个配电变压器的运行数据，我们能够直接测量出该变压器高压和低压侧的正序、逆序以及零序电流的具体数值。利用电流不平衡度的计算公式，可以得出该配电变压器一整天中逆序和零序电流不平衡度的平均值，具体结果展示在图 1 和图 2 中。

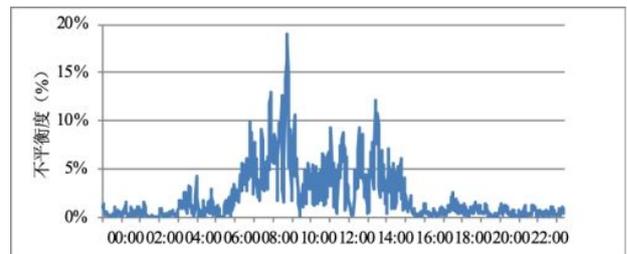


图 1 配电变压器侧的负序平均不平衡度

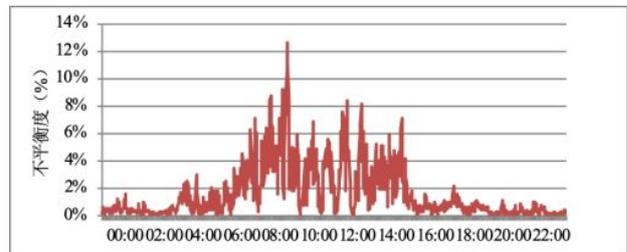


图 2 配电变压器 24 小时三相电流值
配电变压器侧监测的三相电流值如图 3 所示。

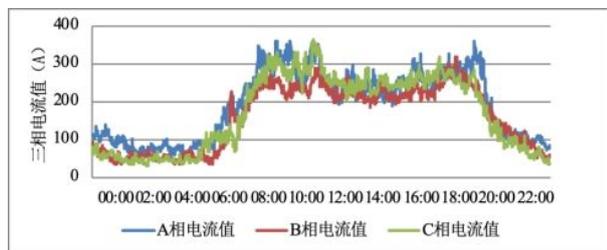


图3 三相电流值

通过对某配电变压器全天的监测数据分析,我们得知在选定的时间里,该配电变压器遇到的最大逆序不平衡度高达 18.97%,而最低仅为 0.01%。同样,零序不平衡度在最大时为 12.63%,最小时也是 0.01%。一天平均下来,逆序电流的不平衡度为 2.13%,零序电流的不平衡度为 1.59%。图表数据表明,该配电变压器负荷较重,有时甚至出现短时间过载现象。由于低压侧负载的不对称性,存在三相不平衡的问题。

对于实验中的配电变压器,型号为 S13-50/10, 10/0.4kV,采用的联接组标号为 Dyn11。10kV 侧的基本阻抗值为 0.204 欧姆,而通常零序阻抗的值非常接近正序阻抗值,略微小一些,如果忽略极小的励磁损耗,可以近似认为是正序阻抗的 1.0 倍。根据监测数据,逆序和零序不平衡的幅度非常相近。在考虑极端三相不平衡情况下,我们可以假设造成的三相不平衡度在 0 到 15%之间。基于这些信息和配电变压器的附加损耗模型,我们能够定量分析三相不平衡和配电变压器附加损耗之间的关系,详细数据展示在表 1 中。

三相不平衡度 ϵ	附加损耗 γ	三相不平衡度 ϵ	附加损耗 γ	三相不平衡度 ϵ	附加损耗 γ
1%	0.01%	6%	0.49%	11%	1.64%
2%	0.05%	7%	0.66%	12%	1.95%
3%	0.12%	8%	0.87%	13%	2.29%
4%	0.22%	9%	1.1%	14%	2.66%
5%	0.34%	10%	1.36%	15%	3.05%

表 1 三相不平衡对配电变压器附加损耗影响的量化关系

从以上分析得出,配电变压器低压侧的三相不平衡问题更为严重,而且在相同的不平衡度条件下,由三相不平衡引起的额外损耗比在 10kV 电路侧的情况更加严峻。

为了深入分析三相不平衡对配电变压器附加损耗的影响,采用一款额定容量为 50kVA、电压等级为 10/0.4kV,联接组标号为 Dyn11 的配电变压器。验证计算和分析结果的准确性,在 PSCAD 仿真软件中,搭建三相不平衡及

三相完全对称两种配电系统的仿真模型。通过模型,在变压器的输入和输出端安装电压和电流测量仪器,以此来研究三相不平衡对变压器带来的额外损耗影响。仿真模型的变压器参数设置严格依据前述分析结果。使用 PSCAD 仿真软件,模拟配电变压器在三相平衡状态与不平衡状态下的损耗情况。

通过在三相四线制的末端注入不同约束,模拟变压器在多种典型的不平衡负载条件下的工作状态,以实际测量由三相不平衡引起的配电变压器的额外损耗,并将测量结果与损耗模型的估算值进行对比,以校验估算公式的准确性。

总结

配电变压器的能量损耗问题一直是制约电力系统实现节能减排目标的关键因素。因此,对于技术人员来说,全方位理解配电变压器能耗损失的根本原因及其产生的机理,并详细分析影响因素与配电网损耗之间的定量关系,成为了一项至关重要的任务。研究表明,尽管三相不平衡对变压器的具体影响各不相同,它们均会导致能耗损失的增加,特别是在长期运行下可能会引起过热,特别是在夏季电力消费高峰期,这种情况极容易导致变压器的损坏。本研究提出的附加损耗计算模型,为变压器的研发设计、损耗评估、配电网的负荷分布管理以及损耗控制提供了重要的数据支持。

参考文献:

- [1]艾精文,张华赢,汪清等 基于有效值的台区电流不平衡度计算方法研究[J] 电测与仪表.2020,(11).
 - [2]魏梅芳,胡毕正,庞文龙等 基于动态三相不平衡度的配电网线损计算方法研究[J] 智慧电力.2020,(2).
 - [3]陶用伟,朱勇,李泽群 计及三相不平衡的配电网损耗计算分析[J] 信息技术.2019,(4).
 - [4]朱明星,李开金 低压配电网三相不平衡度计算方法与应用[J] 电测与仪表.2019,(2).
 - [5]吴俊,诸军,沈海平等 配电网三相不平衡度近似计算方法简析[J] 高压电器(12).211-214.
 - [6]陈鹏伟,肖湘宁, Mesut BARAN 计及分布式电源无功特性的弱环配电网复仿射潮流算法[J] 电力系统自动化.2019,(7).
- 作者简介:郭修华(1967),男,宁波宁变电力科技股份有限公司工程师,长期从事变压器研发设计工作。