

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.03.017

基于电流相位估计的三相不平衡条件下配变损耗计算

孙志鹏, 陶顺

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要:在配电网节能改造中因地制宜地更换高损耗配电变压器尤为重要,计算实际负荷条件下的配变损耗是变压器选型技术经济的关键之一。在低压三相四线制系统中,负荷不平衡往往造成了配变三相电流不对称。文中首先讨论了三相不平衡条件下变压器损耗计算模型,然后面向现有配变低压侧用采系统数据缺失电流相位的情况,提出了变压器低压侧电流相位估算方法,从而建立了三相不平衡条件下基于配变电流相位估算的损耗计算模型,解决了实际工程中因缺失相位数据而无法计算的难题。最后,通过仿真和试验分别对 Yyn0 和 Dyn11 这 2 种常用配变的电流相位估算和损耗计算模型进行了验证。

关键词:三相不平衡;三相四线制;变压器;电流相位;损耗计算

中图分类号: TM421

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)03-0114-06

0 引言

为落实国家“节能减排”政策,国内综合节能服务行业进入了快速发展期,综合节能已成为电网公司的一项重要工作^[1-3]。通过建设配电网综合降损节能改造项目,能有效降低配网综合线损,提升电能质量和配网管理水平,加快建设技术领先、安全可靠的现代配电网^[4-5]。

配电变压器是配电网中主要电气设备之一,且数量巨大,其损耗在配电网中占有很高比重^[6]。因此,在综合降损节能改造项目中,准确实现对配电变压器的损耗量化计算和综合能效评估尤为重要^[7]。目前对配电变压器进行损耗量化计算时,往往认为其负荷三相平衡,然而配电变压器的三相不平衡运行在实际中是不可避免的,变压器三相不平衡运行会使损耗增大^[8-10]。因此,将三相负荷平衡时的变压器损耗计算方法应用在实际变压器节能改造项目评估中显然是不准确的。

国内外学者对配电网中三相不平衡条件下的损耗计算问题已展开了研究,文献[11-12]研究了引入不平衡度的低压配网线损计算方法。文献[13]主要分析了三相不平衡问题对变压器的影响。文献[14]指出三相不平衡条件下变压器附加损耗主要为附加铜损和零序损耗,并给出了1台 Yyn0 联结变压器的损耗算例,但该算例在计算附加铜损时忽略了高压侧绕组的直流电阻损耗,使得计算结果的准确度降低;在计算零序损耗时零序电流被作为已知量直接给出,且并未说明其在实际情况中的获

取方式。总之,上述计算三相不平衡条件下变压器损耗的方法对数据类型需求较多,除需已知变压器高、低压侧绕组直流电阻、零序电阻之外,还需已知变压器低压侧三相电流的相量(大小和相位)。但在现有低压配网常规配电台区的长期运行数据采集集中,不论是电能质量监测系统还是用采系统,往往只有配变单侧(一般为低压侧)电压和电流监测,且无法提供电压、电流的相位信息。由于数据上的缺失,上述文献中的损耗计算方法难以在实际三相不平衡运行环境中得到应用。

针对配电台区数据采集系统现状,文中在仅已知目前用采系统运行数据的条件下,根据实际运行状况进行合理假设,提出了一种基于电流相位估计的三相不平衡条件下配变损耗计算模型,并通过仿真与试验验证了该方法的正确性和工程可行性。

1 三相不平衡条件下变压器损耗计算模型

1.1 变压器损耗

由于变压器空载损耗基本不受三相不平衡的影响,故文中只讨论变压器的负载损耗。一般地,变压器的负载损耗表示如下:

$$P_k = P_{dw} + P_{dl} + P_{ec} + P_{oe} \quad (1)$$

式中: P_k 为变压器负载损耗; P_{dw} 为绕组的直流电阻损耗; P_{dl} 为引线的直流电阻损耗; P_{ec} 为绕组的涡流损耗; P_{oe} 为金属结构件(如夹件,压板,油箱等)的杂散损耗。

对一般的电力变压器而言,变压器绕组的直流电阻损耗 P_{dw} 约占整个负载损耗 P_k 值的 90%^[15-16],变压器引线的直流电阻损耗 P_{dl} 占比很小,一般为 P_k 值的 1%左右,绕组涡流损耗 P_{ec} 约占

收稿日期:2019-11-27;修回日期:2020-01-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777066)

P_k 值的 2%^[17],金属结构件的杂散损耗大小与变压器结构和漏磁通有关。

上述变压器负载损耗分类是从变压器设计角度考虑的,在实际工程中若一一对应进行计算,过程将十分繁琐。因此,文中从电路的角度出发,以变压器等值电路为基础,利用等值电阻法进行变压器损耗计算,根据等值电阻计算所得损耗既包括绕组和引线直流电阻损耗,又包含了绕组涡流损耗和结构件杂散损耗。

1.2 理论计算方法

在计算不平衡条件下变压器负载损耗时,首先利用对称分量法将变压器低压侧的三相不平衡负荷电流分解为 3 组对称电流,分别为正序、负序和零序电流,再结合变压器归算至低压侧的正序、负序和零序等值电阻,即可求出各序电流在各自序电路等值电阻上的损耗,三序损耗之和即为变压器总负载损耗。对称分量法对低压侧电流的分解为:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a(1)} \\ \dot{I}_{a(2)} \\ \dot{I}_{a(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $a = -1/2 + j\sqrt{3}/2$; $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ 为三相电流相量; $\dot{I}_{a(1)}, \dot{I}_{a(2)}, \dot{I}_{a(0)}$ 分别为 a 相正序、负序和零序电流相量。

正序电流在变压器正序等值电阻上引起的损耗为:

$$P_{(1)} = 3I_{a(1)}^2 R_{T1} \quad (3)$$

式中: $I_{a(1)}$ 为变压器低压侧的正序电流模值; R_{T1} 为归算至低压侧的变压器单相正序等值电阻。

负序电流在变压器负序等值电阻上引起的损耗为:

$$P_{(2)} = 3I_{a(2)}^2 R_{T2} \quad (4)$$

式中: $I_{a(2)}$ 为变压器低压侧的负序电流模值; R_{T2} 为归算至低压侧的变压器单相负序等值电阻。

零序电流在变压器零序等值电阻上引起的损耗为:

$$P_{(0)} = I_0^2 R_{T0} = (3I_{a(0)})^2 R_{T0} \quad (5)$$

式中: I_0 为变压器中性线电流模值; $I_{a(0)}$ 为变压器低压侧的零序电流; R_{T0} 为变压器三相零序等值电阻,一般通过试验测得。

综上,三相不平衡条件下变压器总损耗 P_f 为:

$$P_f = P_0 + P_{(1)} + P_{(2)} + P_{(0)} \quad (6)$$

式中: P_0 为变压器空载损耗。

1.3 配变低压侧电流相位估算

在实际情况下,使用上述方法计算损耗的关键

为对称分量法,而对称分量法是一种对相量的变换方法,这要求在实际计算时必须已知变压器低压侧电流相量值,然而实际低压配网用采系统现状是只有三相电压、电流有效值和三相有功功率、无功功率值,无法提供电压、电流的相位信息。针对这一问题,文中提出一种由三相电压、电流有效值和三相有功功率、无功功率值估算电流相位的方法。

由于已知三相有功功率和无功功率,因此变压器低压侧相电流相位与相电压相位关系为:

$$\varphi_I = \varphi_U - \varphi = \varphi_U - \arctan \frac{Q}{P} \quad (7)$$

式中: φ_U 为变压器低压侧相电压相位; φ_I 为变压器低压侧相电流相位; φ 为变压器低压侧功率因数角; P 为变压器低压侧各相有功功率; Q 为变压器低压侧各相无功功率。

由对称分量法可知,三相不对称电压可被分解为正序、负序和零序 3 组对称的序电压分量^[18],由三相不平衡引起的负序电压值与系统负序阻抗以及负序电流大小有关,工程上计算不对称负荷在公共连接点上造成的三相电压不平衡度 ε_U 的近似公式如下:

$$\varepsilon_U \approx \frac{\sqrt{3}I_2 U_L}{10S_d} \times 100\% \quad (8)$$

式中: I_2 为负荷电流负序分量, A; U_L 为公共连接点的线电压方均根值, kV; S_d 为公共连接点的三相短路容量, MV·A。

GB/T 15543—2008《电能质量 三相电压不平衡》规定:电网正常运行时电力系统公共连接点电压不平衡度允许值为 2%;接于公共连接点的每个用户,引起该点正常电压不平衡度允许值一般为 1.3%^[19]。

实际低压配电网中的三相不平衡问题主要为三相电流不平衡,电压不平衡度很小,因此在分析时可忽略系统的负序电压,由于线电压不存在零序分量,因此可认为低压侧线电压是三相对称的。

在保持线电压对称条件下,如图 1 所示,图中 $\dot{U}'_a, \dot{U}'_b, \dot{U}'_c$ 为三相平衡时相电压; O' 为三相平衡时中性点; $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ 为实际三相不平衡时相电压; O 为零序电压引起的漂移后中性点。

由图 1 可列出三元方程如下:

$$\begin{cases} U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} \\ \theta_{ab} + \theta_{bc} + \theta_{ca} = 2\pi \end{cases} \quad (9)$$

式中: U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} 为变压器低压侧线电压有效值; $\theta_{ab}, \theta_{bc}, \theta_{ca}$ 为低压侧相电压相角差。

根据余弦定理又有:

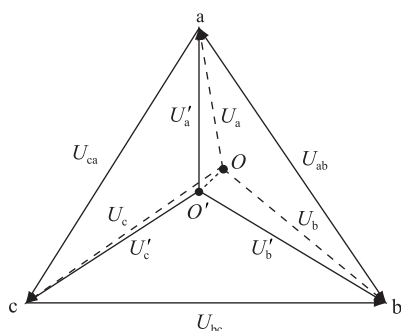


图1 中性点漂移图

Fig.1 Diagram of neutral point drift

$$\begin{cases} U_{ab} = \sqrt{U_a^2 + U_b^2 - 2U_a U_b \cos\theta_{ab}} \\ U_{bc} = \sqrt{U_b^2 + U_c^2 - 2U_b U_c \cos\theta_{bc}} \\ U_{ca} = \sqrt{U_c^2 + U_a^2 - 2U_c U_a \cos\theta_{ca}} \end{cases} \quad (10)$$

式中： U_a, U_b, U_c 为变压器低压侧相电压有效值。

将式(10)代入式(9)，得：

$$\begin{cases} U_a^2 - U_c^2 + 2U_b U_c \cos\theta_{bc} - 2U_a U_b \cos\theta_{ab} = 0 \\ U_b^2 - U_a^2 + 2U_c U_a \cos\theta_{ca} - 2U_b U_c \cos\theta_{bc} = 0 \\ \theta_{ab} + \theta_{bc} + \theta_{ca} = 2\pi \end{cases} \quad (11)$$

可以看出上述方程为三元超越方程组，其中 U_a, U_b, U_c 为已知量，经过迭代法求解方可计算出三相不平衡条件下三相电压的相角差 $\theta_{ab}, \theta_{bc}, \theta_{ca}$ 。然后以 \dot{U}_a 为基准便可得到三相电压的相量形式，即：

$$\begin{cases} \dot{U}_a = U_a \angle 0 \\ \dot{U}_b = U_b \angle -\theta_{ab} \\ \dot{U}_c = U_c \angle \theta_{ca} \end{cases} \quad (12)$$

当 I_a, I_b, I_c 为变压器低压侧三相电流有效值时，结合式(7)和式(12)可得变压器低压侧三相电流相量形式，即：

$$\begin{cases} \dot{I}_a = I_a \angle -\varphi_a \\ \dot{I}_b = I_b \angle (-\theta_{ab} - \varphi_b) \\ \dot{I}_c = I_c \angle (\theta_{ca} - \varphi_c) \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)代入式(2)即可得到变压器低压侧电流分解后的正序、负序和零序电流值。

2 PSCAD 仿真验证

为了验证上述计算方法的可行性，现对低压配电网2种常用结构台区变压器进行仿真验证。在PSCAD/EMTDC中搭建仿真试验平台，变压器模型分别为：1台10kV/0.4kV, 125kV·A Yyn0联结方式配电变压器，其空载损耗为135W，额定负载损耗

为1006W，空载电流为0.12%，阻抗电压为4.02%，零序电阻为0.1136Ω；1台10kV/0.4kV, 400kV·A Dyn11联结方式配电变压器，其空载损耗为388W，额定负载损耗为3680W，空载电流为0.19%，阻抗电压为4.14%，零序电阻为0.0016Ω。实验负荷为3组不平衡阻感负荷，三相功率因数分别为0.9, 0.8, 0.9。设置如表1所示。

表1 不平衡阻感负荷

Table 1 Unbalanced resistance and inductive load

负荷	A相		B相		C相	
	R_a	X_a	R_b	X_b	R_c	X_c
组1	1.5	0.7	1.0	0.8	3.0	1.5
组2	1.5	0.7	7.5	5.6	3.0	1.5
组3	1.5	0.7	7.5	5.6	7.5	3.6

2.1 Yyn0 联结变压器

Yyn0联结变压器的仿真验证结果如表2—表4所示。

表2 Yyn0变压器低压侧电流相位估算

Table 2 Current phase estimation in low voltage side of Yyn0 transformer

负荷	仿真值/(°)			计算值/(°)			最大误差值/(°)	最大误差率/%
	A相	B相	C相	A相	B相	C相		
组1	0	-137.3	116.4	0	-138.7	114.0	2.4	2.10
组2	0	-126.2	129.3	0	-127.2	129.4	1.0	0.80
组3	0	-128.9	129.8	0	-130.3	130.1	1.4	1.10

表3 基于电流相位估算的

Yyn0变压器低压侧序电流

Table 3 Yyn0 transformer low voltage side sequence current based on current phase estimation

负荷	电流仿真值/A			电流计算值/A			最大误差值/A	最大误差率/%
	正序	负序	零序	正序	负序	零序		
组1	124.6	40.1	18.7	124.5	41.1	18.4	1.3	1.60
组2	74.0	34.3	26.0	73.9	34.4	25.9	0.1	0.40
组3	59.5	35.3	30.2	60.3	35.2	29.5	0.8	2.30

表4 Yyn0变压器损耗

Table 4 Yyn0 transformer loss

负荷	仿真值/W	计算值/W	误差率/%
组1	1018	976	-4.3
组2	1026	1026	0
组3	1218	1175	-3.6

由表2可以看出，Yyn0联结变压器低压侧相位估算结果的最大误差率为2.1%。由表3可以看出由估算出的变压器低压侧电流相位分解得到的序电流值与仿真值基本一致，最大误差率2.3%。由表

4 可以看出在不平衡阻感负荷下,对于 Yyn0 联结变压器,基于文中提出的变压器低压侧电流相位估算结果计算出的损耗值与仿真损耗值基本一致,误差率不超过 5%,验证了文中方法的正确性和工程可用性。

2.2 Dyn11 联结变压器

Dyn11 联结变压器仿真验证结果见表 5—表 7。

表 5 Dyn11 变压器低压侧电流相位估算

Table 5 Simulation verification of current phase estimation in low voltage side of Dyn11 transformer

负荷	仿真值/(°)			计算值/(°)			最大误差值/(°)	最大误差率/%
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相		
组 1	0	-131.5	120.1	0	-132.0	119.6	0.5	0.40
组 2	0	-130.6	120.4	0	-130.1	120.4	0.5	0.40
组 3	0	-130.7	120.4	0	-131.0	120.4	0.7	0.50

表 6 基于电流相位估算的 Dyn11 变压器低压侧序电流

Table 6 Dyn11 transformer low voltage side sequence current based on current phase estimation

负荷	电流仿真值/A			电流计算值/A			最大误差值/A	最大误差率/%
	正序	负序	零序	正序	负序	零序		
组 1	128.8	40.5	26.2	129.0	40.9	25.9	0.4	1.10
组 2	76.9	34.1	31.9	76.9	34.1	31.9	0	0
组 3	63.1	38.6	35.9	63.1	38.6	35.9	0	0

表 7 Dyn11 变压器损耗

Table 7 Dyn11 transformer loss

负荷	仿真值/W	计算值/W	误差率/%
组 1	606	600	-1.00
组 2	487	481	-1.30
组 3	475	467	-1.70

由表 5 可以看出, Dyn11 联结变压器相位估算结果最大误差率为 0.5%。由表 6 可看出,由估算的变压器低压侧电流相位分解得到的序电流值与仿真值基本一致,最大误差率为 1.1%。由表 7 可看出在不平衡阻感负荷下,对于 Dyn11 联结变压器,基于文中提出的变压器低压侧电流相位估算结果计算出的损耗值与仿真损耗值基本一致,误差率不超过 2%,验证了文中方法的正确性和工程可用性。

3 试验验证

试验变压器型号与仿真相同,共使用 2 台仪器进行测量,包括 1 台功率分析仪和 1 台电能质量分析仪。其中功率分析仪用来测量高、低压侧的电压、电流有效值以及功率值;电能质量分析仪用于低压侧三相电压、电流的录波分析,采样频率为 2 kHz,录波所得数据用于验证电流相位估算和序电流计算。试验原理如图 2 所示。

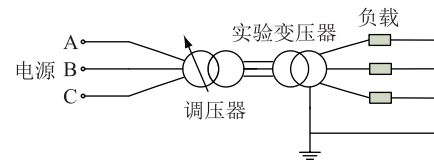


图 2 试验原理

Fig.2 Experimental schematic diagram

Yyn0 联结变压器不平衡试验的序电流和损耗验证结果如表 8、表 9 所示。

表 8 基于电流相位估算的 Yyn0 变压器低压侧序电流

Table 8 Yyn0 transformer low voltage side sequence current based on current phase estimation

负荷	电流试验值/A			电流计算值/A		
	正序	负序	零序	正序	负序	零序
组 1	39.7	5.1	5.0	40.0	5.0	5.0
组 2	97.4	23.9	21.3	98.1	23.4	20.4
组 3	146.8	46.3	33.6	147.1	46.2	30.3
组 4	79.9	30.7	29.9	80.3	31.4	28.1
组 5	66.5	37.0	35.4	66.3	36.4	34.2

表 9 Yyn0 变压器损耗

Table 9 Yyn0 transformer loss

负荷	仿真值/W	计算值/W	误差率/%
组 1	181.6	188.8	4.30
组 2	743.3	787.4	6.00
组 3	1 910.5	1 796	-6.00
组 4	1 152.3	1 101	-4.40
组 5	1 289.7	1 288	-0.10

Dyn11 联结变压器不平衡试验的序电流和损耗验证结果如表 10、表 11 所示。

表 10 基于电流相位估算的 Dyn11 变压器低压侧序电流

Table 10 Dyn11 transformer low voltage side sequence current based on current phase estimation

负荷	电流试验值/A			电流计算值/A		
	正序	负序	零序	正序	负序	零序
组 1	39.5	5.0	5.2	40.1	5.0	5.2
组 2	98.3	25.0	25.2	98.2	24.4	24.4
组 3	148.1	42.7	43.0	148.1	42.4	41.3
组 4	82.9	34.2	35.0	83.2	34.2	33.5
组 5	69.5	39.9	40.0	69.4	39.2	39.4

表 11 Dyn11 变压器损耗计算验证

Table 11 Calculation and verification of Dyn11 transformer loss

负荷	仿真值/W	计算值/W	误差率/%
组 1	394.5	406.8	3.20
组 2	482.8	499.6	3.60
组 3	710.7	685.1	-3.50
组 4	459.7	481.7	4.90
组 5	452.4	465.6	3.00

可以看出在设置的不平衡负荷下,通过估算电流相位法计算的损耗值与现场试验损耗值基本一致,其中 Yyn0 联结变压器损耗误差率不超过 5%, Dyn11 联结变压器损耗误差率不超过 6%,验证了文中方法的正确性和工程可行性。

4 结语

文中针对低压配电网用采系统相位数据缺失的现状,提出了一种估算配变低压侧电流相位的方法,在此基础上根据对称分量法原理建立了一种适合工程应用的三相不平衡条件下配变损耗计算模型,最后通过仿真和试验验证了该模型的工程实用性和准确性。该模型可与目前配变用采系统数据高度结合,用于三相不平衡条件下配变损耗计算。文中模型可由配变低压侧三相电压、电流有效值和有功功率、无功功率值估算出低压侧电流相位,使对称分量法在实际工程中得以应用,解决了现实工况中相位数据缺失的问题,提高了三相不平衡条件下配变损耗计算的准确性,对配变选型以及配电网的综合降损节能改造工作有重要意义。

参考文献:

- [1] 苏立,庄红军,吴瑀,等. 低压配电网综合节能控制技术研究与应用[J]. 中国设备工程,2017(19):113-114.
SU Li,ZHUANG Hongjun,WU Yu, et al. Research and application of comprehensive energy saving control technology in low voltage distribution network [J]. China Plant Engineering,2017 (19):113-114.
- [2] 杨青书,李贵璞,单中健,等. 配电网综合节能改造及电能质量提升[J]. 农村电气化,2018(5):14-15.
YANG Qingshu,LI Guipu,SHAN Zhongjian, et al. Comprehensive energy-saving transformation of distribution network and improvement of power quality [J]. Rural electrification, 2018 (5):14-15.
- [3] 戴诗朦,孙鸣,刘俊勇. 配电网降损节能装置中电容器组的选址定容问题研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(6):54-61.
DAI Shimeng,SUN Ming,LIU Junyong. Research of the placement and capacity of capacitor bank of conservation reduction voltage device in distribution network[J]. Power System Protection and Control,2018,46(6):54-61.
- [4] 尹文俊. 浅析 10 kV 配电网的线损管理及降损措施[J]. 通讯世界,2019,26(2):125-126.
YIN Wenjun. Analysis of line loss management and loss reduction measures for 10 kV distribution network [J]. Communication World,2019,26(2):125-126.
- [5] 姜学宗. 配电网降损措施分析[J]. 电气时代,2018(9):74-75.
JIANG Xuezhong. Analysis of loss reduction measures in distribution network [J]. Electric Times,2018(9):74-75.
- [6] 王育槐,焦瑾. 配电变压器低压侧互联以降低配电网线损率[J]. 电力系统自动化,2008(16):103-106.
WANG Yuhuai,JIAO Jin. Interconnection of low voltage side of distribution transformer to reduce line loss rate of distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008 (16):103-106.
- [7] 蒋利民,闫华光,王维洲,等. 配电变压器更换项目节能测量与验证的新算法[J]. 电测与仪表,2013,50(5):27-30.
JIANG Limin,YAN Huaguang,WANG Weizhou, et al. A new algorithm for measuring and verifying energy saving in distribution transformer replacement project [J]. Electrical Measurement and Instrument,2013,50(5):27-30.
- [8] 王代弟. 配电网三相不平衡问题的分析与研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2007.
WANG Daidi. Analysis and research of three-phase unbalance in distribution network [D]. Shenyang:Shenyang University of Technology,2007.
- [9] 郭志民,张永浩,周兴华,等. 考虑三相不平衡的低压用户业扩报装供电方案精准编制[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(12):71-76.
GUO Zhimin,ZHANG Yonghao,ZHOU Xinghua, et al. Accurate compilation of power supply scheme for low voltage customer considering the three-phase unbalance [J]. Power System Protection and Control,2018,46(12):71-76.
- [10] 郭兆成,车建涛,郭启栋,等. 基于低压配网功率和用电量信息的三相不平衡负荷调整[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(21):86-95.
GUO Zhaocheng,CHE Jiantao,GUO Qidong, et al. Adjustment of three-phase unbalanced load in distribution network based on its historical power data and power consumption [J]. Power System Protection and Control,2018,46(21):86-95.
- [11] 郭峰,姚莉娜,刘恒,等. 引入三相不平衡度的低电压网理论线损计算[J]. 电力自动化设备,2007,27(11):51-54.
GUO Feng,YAO Lina,LIU Heng, et al. Theoretical line loss calculation with three-phase unbalance degree for low-voltage automation distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(11):51-54.
- [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 [J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2011,23(2):24-30.
- [13] 陈伟国. 三相不平衡对配电变压器损耗影响的分析[J]. 低碳世界,2017(35):76-77.
CHEN Weiguo. Analysis of influence of three-phase unbalance on loss of distribution transformer [J]. Low Carbon World, 2017(35):76-77.
- [14] 杨云龙,王凤清. 配电变压器三相不平衡运行带来的附加损耗、电压偏差及补偿方法[J]. 电网技术,2004,28(8):73-76.
YANG Yunlong,WANG Fengqing. Additional loss and voltage deviation caused by unbalanced operation of distribution trans-

- former and coun-termeasures[J]. Power System Technology, 2004,28(8):73-76.
- [15] 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.
YAN Zhiqiang, LEI Xia, HE Jianping, et al. Study on the influence of three-phase unbalance on loss of distribution transformer[J]. Electrical Measurement and Instrument, 2017, 54(16):43-49.
- [16] 黄华. 电力变压器负载损耗的影响因素及设计偏差分析[J]. 电力与能源,2018,39(4):482-485,495.
HUANG Hua. Analysis on influencing factors and design deviation of load loss of power transformer [J]. Power and Energy, 2018,39(4):482-485,495.
- [17] 在供应非正弦负荷电流的过程中确定加液式和干式电力和配电变压器的性能的 IEEE 推荐操作规程:IEEE C57.110—2008[S].
IEEE recommended practice for establishing liquid-filled and dry-type power and distribution transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents; IEEE C57.110—2008 [S].
- [18] 陈朝煜. 用对称分量法分析线路损耗[J]. 福建建筑,2017(3):92-95.
CHEN Chaoyu. Analysis of line loss by symmetric component method[J]. Fujian Architecture,2017(3):92-95.
- [19] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
XIAO Xiangning. Power quality analysis and control[M]. Beijing:China Electric Power Press,2010.

作者简介:



孙志鹏

孙志鹏(1996),男,硕士在读,研究方向为电能质量分析与控制(E-mail:sunzhipeng361@163.com);

陶顺(1972),女,博士,副教授,研究方向为电能质量分析与控制。

Calculation of distribution loss under three-phase unbalance based on current phase estimation

SUN Zhipeng, TAO Shun

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: It is particularly important to replace high-loss distribution transformers according to local conditions in the energy-saving transformation of distribution networks. Calculating distribution transformer losses under actual load conditions is one of the key points of transformer selection technology and economy. In low-voltage three-phase and four-wire system, unbalanced load often results in asymmetrical distribution and transformer three-phase current. The loss calculation model of transformer under three-phase unbalance condition is discussed at first, and then the current phase estimation method of transformer low-voltage side is put forward in view of the fact that the current phase of existing distribution transformer low-voltage side mining system data is missing. Thus, the loss calculation model based on distribution transformer current phase estimation under three-phase unbalance condition is established, which solves the problem that cannot be calculated due to missing phase data in actual engineering. Finally, the current phase estimation and loss calculation models of Yyn0 and Dyn11 commonly used transformers are verified by simulation and experiment respectively.

Keywords: three-phase imbalance; three-phase four-wire system; transformer; current phase; loss calculation

(编辑 方晶)