

DOI: 10.3969/j.issn.1672-0792.2024.08.004

实现配电变压器效率最大化的治理方法研究

姚伟¹, 刘彦彦¹, 郭志明²

- (1. 伊犁职业技术学院 机电化工学院, 新疆 伊宁 835000;
2. 国网新疆电力有限公司 昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100)

摘要: 铁损、铜损是影响配电变压器效率的基本损耗, 尤其当三相负荷不平衡发生时还会带来附加损耗。为实现配电变压器效率最大化, 结合低压供配电系统三相幅值和功率因数均不平衡的现状, 通过数学建模对影响配电变压器效率的因素进行理论分析, 并建立三相负荷不平衡度与配电变压器效率关系的度量式, 基于联合机制提出实现配电变压器效率最大化算法。通过算例与实验法对所提理论进行验证分析, 结果表明, 通过治理中性线电流可以有效提高配电变压器效率。结合实验结果提出了实现配电变压器效率最大化的改良措施。

关键词: 损耗; 数学建模; 配电变压器效率; 三相负荷不平衡度; 联合机制

中图分类号: TM71; TM76; TP23 文献标识码: A 文章编号: 1672-0792(2024)08-0029-08

Research on Governance Method to Maximize the Efficiency of Distribution Transformers

YAO Wei¹, LIU Yanyan¹, GUO Zhiming²

- (1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Yili Vocational and Technical College, Yining 835000, China;
2. Changji Power Supply Company of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Changji 831100, China)

Abstract: Iron loss and copper loss are basic losses that affect the efficiency of distribution transformers, especially the occurrence of three-phase load unbalance can also bring additional losses. In order to maximize the efficiency of distribution transformers, combined with the current unbalanced situations of three-phase amplitude and power factors in low-voltage power supply and distribution systems, theoretical analysis is conducted on the factors affecting the efficiency of distribution transformers through mathematical modeling. The measurement formula for the relationship between three-phase load unbalance and distribution transformer efficiency is established, and an algorithm based on joint mechanism for maximizing distribution transformer efficiency is proposed. The proposed theory is verified and analyzed through numerical examples and experimental methods, and the results show that the efficiency of distribution transformers can be effectively improved by controlling the neutral line current. Based on the experimental results, improvement measures have been proposed to maximize the efficiency of distribution transformers.

Key words: loss; mathematical modeling; efficiency of distribution transformers; unbalanced three-phase load; joint mechanism

0 引言

损耗是影响配电变压器效率的关键因素。尤其在三相负荷不平衡发生时,损耗对配电变压器效率影响更大。对于低压供配电系统而言,三相负荷不平衡更多地发生在用户用电端。用户侧单相用电设备接入电网的不确定性是造成三相负荷不平衡的关键因素。

目前,低压供配电系统较多采用的是 Dyn11 和 Yyn0 联结方式的 10 kV 电压等级的配电系统。10 kV 配电变压器数量多、总容量大,其在运行过程中的电能损耗也较大,且较容易发生三相负荷不平衡。因此,研究配电变压器最佳运行效率,对于节约能源、降低成本具有十分重要的意义^[1,2]。

为减少运行成本,在生产实践中经常存在以下运行工况:1)本需 2 台或 2 台以上变压器并列运行,但实际只投运 1 台;2)为降低配电变压器有功损耗、追求最佳负载率,选用大容量变压器^[3];3)配电变压器安装地点不够合理导致供电半径过大^[4]。以上这些都是导致配电变压器效率低的因素。

从降低损耗角度看,低压供配电系统的期望运行状态是三相负荷平衡。为了控制三相负荷不平衡,国家电网公司《配电网运维规程》(Q/GDW 1519—2014)规定,配电变压器的负荷不平衡度应符合:Yyn0 接线变压器负荷不平衡度不大于 15%,零线电流不大于变压器额定电流的 25%;Dyn11 接线变压器负荷不平衡度不大于 25%,零线电流不大于变压器额定电流的 40%^[5]。所以,探究三相负荷不平衡度因素对配电变压器效率的影响,对提高供电质量和节能降损具有重要意义。

文献[6]分析了变压器 Y-Δ 接线和 Y-Y 接线时三相负荷不平衡与配电变压器损耗影响关系,但仅模拟了三相纯电阻负载条件,未得到配电变压器损耗与三相负荷不平衡度的量化关系式。文献[7]分析了负载率对 10 kV 配电变压器损耗的影响,得到配电变压器的经济运行区间,并且分析了配电变压器扩容的时机及其经济性,但没有给出负载率与变压器效率的关系。文献[8]对变压器实际运行负载率进行了数据分析,但没有建立算法模型。文献[9]只讨论了负荷分布不平衡的线

损计算方法。文献[10]提出基于粒子群优化算法的负荷换相方案来治理三相不平衡,但换相开关的可控性和可靠性未能有效解决。文献[11-13]提出采用无功补偿方式来提高变压器效率,但缺乏实验性分析。文献[14]研究了用基于改进遗传算法的配电网时间序列来实现三相不平衡优化调控,但缺乏该方法在实际中的应用案例。文献[15,16]提出通过控制换相开关调整有功负荷来实现三相平衡进而降低损耗的办法,但该方法在实际中参数可调整的范围很小,且还会给电网带来其他影响。

鉴于此,为实现配电变压器效率最大化,本文以数学建模与实验分析为基础,提出了提高配电变压器效率的一整套算法,同时给出相关治理策略。针对影响配电变压器效率的铁损、铜损等因素分别建立数学分析模型,最终得到配电变压器效率最大化的判据。对实验及案例加以分析,得到负载率、三相负荷不平衡度、变压器出口功率与配电变压器效率的影响关系;基于联合机制,提出实现配电变压器效率最大化的治理算法。

1 配电变压器效率最大化模型建立

1.1 三相不平衡配电变压器负载率

将变压器负载率分为:整体过载、整体重载、单相过载、整体重载、单相过载、单相重载^[17]。

定义变压器单相负载率 β 为变压器副边侧单相电流与额定电流的比值,即:

$$\beta_{\phi} = \frac{I_{\phi}}{I_N} \times 100\%, \quad \phi \in \{a, b, c\} \quad (1)$$

式中: I_{ϕ} 为变压器副边侧相电流; I_N 为变压器原边侧额定电流。

引入电流不平衡系数 α , 并令

$$\alpha_{\phi} = \frac{I_{\phi} - I_{av}}{I_N} \times 100\%, \quad \phi \in \{a, b, c\} \quad (2)$$

式中: I_{av} 为三相平均电流,即 $I_{av} = (I_a + I_b + I_c) / 3$ 。

由于 $\sum \alpha = 0$, 即

$$\alpha_a + \alpha_b + \alpha_c = 0 \quad (3)$$

定义 β_0 为变压器平均负载率, 并令

$$\beta_0 = \frac{I_{av}}{I_N} \quad (4)$$

把式 (1) (3) (4), 代入式 (2), 可得:

$$\alpha_\phi = \beta_\phi - \beta_0, \phi \in \{a, b, c\} \quad (5)$$

把式(5)代入式(3), 可得:

$$\beta_a + \beta_b + \beta_c = 3\beta_0 \quad (6)$$

对于幅值和功率因数均不平衡的三相不平衡系统, 变压器单相负载率还可以表示为:

$$\beta_\phi = \frac{P_\phi}{U_N I_N \cos\varphi_2} \times 100\%, \phi \in \{a, b, c\} \quad (7)$$

式中: P_ϕ 为三相输出功率; $\cos\varphi_2$ 为变压器功率因数。

1.2 三相不平衡配电变压器铁损

根据铁损的定义^[18], 三相不平衡时, 变压器铁损为:

$$P_{Fe} = \lambda \frac{f}{100} B_m^2 G + I_e^2 R_m + \mu I_{20}^2 R_{20m} \quad (8)$$

式中: P_{Fe} 为变压器的铁损; λ 为损耗系数; f 为交变频率; B_m 为磁强幅值; G 为铁芯质量; I_e 为感应电流; R_m 为磁阻; I_{20} 为变压器二次侧零序电流分量; μ 为 I_{20} 作用在变压器上的系数; R_{20m} 为二次侧零序电流通路作用下的等效电阻。

1.3 三相不平衡配电变压器铜损

铜损为变压器三相绕组的损耗。假设: K 为变压器变比, Z_{CU} 为变压器单相绕组铜抗, I_a 、 I_b 、 I_c 为变压器二次侧相电流, P_{CUN} 为三相平衡变压器铜损, P_{CUN} 为三相不平衡变压器铜损, ΔP_{CU} 为附加铜损。

当三相不平衡时, 变压器铜损表示为:

$$P_{CUN} = \frac{1}{K} (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) Z_{CU} \quad (9)$$

当三相平衡时, 变压器铜损表示为:

$$P_{CUN} = \frac{1}{K} 3[(I_a + I_b + I_c)/3]^2 Z_{CU} \quad (10)$$

则因三相不平衡产生的附加铜损为:

$$\Delta P_{CU} = P_{CUN} - P_{CUN} \quad (11)$$

代入相关公式, 并整理可得:

$$\Delta P_{CU} = \frac{1}{K} [(\beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2) - 3\beta_0^2] I_N^2 Z_{CU} \quad (12)$$

定义三相负荷不平衡度为 K_χ , 并令

$$K_\chi = \beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2, \chi \in \{U, I, P\} \quad (13)$$

式中: U 、 I 、 P 分别对应三相负荷不平衡度的电压、电流和功率形式。

把式(13)代入式(12), 可得:

$$\Delta P_{CU} = \frac{1}{K} (K_\chi - 3\beta_0^2) I_N^2 Z_{CU} \quad (14)$$

把式(1)(13)代入式(9), 则

$$P_{CUN} = \frac{1}{K} K_\chi I_N^2 Z_{CU} \quad (15)$$

1.4 三相不平衡配电变压器损耗

定义三相不平衡时变压器损耗为 ΔP , 可以将其看作铁损和铜损的总和, 即:

$$\Delta P = P_{Fe} + P_{CUN} \quad (16)$$

把式(8)(15)代入式(16), 可得:

$$\Delta P = \lambda \frac{f}{100} B_m^2 G + I_e^2 R_m + \mu I_{20}^2 R_{20m} + \frac{1}{K} K_\chi I_N^2 Z_{CU} \quad (17)$$

1.5 三相负荷不平衡度与配电变压器效率关系

根据变压器效率的定义可得^[19]:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = (1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P}) \times 100\% \quad (18)$$

式中: η 为变压器的效率; P_2 为变压器的输出功率; P_1 为变压器的输入功率。

把式(17)代入式(18)可得三相不平衡时变压器效率为:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + \frac{1}{K} K_\chi I_N^2 Z_{CU}} \times 100\% \quad (19)$$

从式(19)可以看出三相负荷不平衡度 K_χ 与变压器效率 η 的关系。以此式作为检测配电变压器效率的判据。

1.6 配电变压器效率最大化

对式(19)求导, 并令: $\frac{d\eta}{dK_\chi} = 0$, 得

$$\frac{1}{K} I_N^2 Z_{CU} = 0$$

即当 $I_N = 0$ 时, 配电变压器有最大效率 η_{max} 。

$$\eta_{max} = \frac{P_2}{P_{Fe} + P_2} \times 100\% \quad (20)$$

可知, 中性线电流越大, 配电变压器效率越低。若想实现配电变压器效率最大化, 必须通过治理使中性线电流为零。

2 配电变压器效率最大化分析

2.1 配电变压器效率最大化的实验建模

方式0: 三相负荷平衡。

令

$$\alpha_a = \alpha_b = \alpha_c = 0 \quad (21)$$

把式(5)(8)(21)代入式(13), 可得:

$$K_\chi = 3\beta_0^2, \chi \in \{U, I, P\} \quad (22)$$

把式(22)代入式(17),可得此时变压器损耗 ΔP_0 。

$$\Delta P_0 = P_{Fe} + \frac{1}{K} 3\beta_0^2 I_N^2 Z_{CU} \quad (23)$$

三相负荷不平衡时,实验负荷可以按照以下3种方式选取^[20]。

方式1: 一相负荷重、一相负荷轻、第三相取平均负荷。

假设: a相负荷重, b相负荷轻, c相负荷为平均负荷, 令

$$\begin{cases} \alpha_a = \alpha \\ \alpha_b = -\alpha \\ \alpha_c = 0 \end{cases} \quad (24)$$

把式(5)代入式(24),可得变换式

$$\begin{cases} \beta_a = \alpha + \beta_0 \\ \beta_b = -\alpha + \beta_0 \\ \beta_c = 0 + \beta_0 \end{cases} \quad (25)$$

把式(25)代入式(13),可得:

$$K_\chi = 3\beta_0^2 + 2\alpha^2, \chi \in \{U, I, P\} \quad (26)$$

把式(26)代入式(17),则此时变压器损耗 ΔP_1 为:

$$\Delta P_1 = P_{Fe} + \frac{1}{K} (3\beta_0^2 + 2\alpha^2) I_N^2 Z_{CU} \quad (27)$$

方式2: 一相负荷重、两相负荷轻。

假设: a相负荷重, b相负荷轻, c相负荷轻, 令

$$\begin{cases} \alpha_a = \alpha \\ \alpha_b = -\frac{1}{2}\alpha \\ \alpha_c = -\frac{1}{2}\alpha \end{cases} \quad (28)$$

把式(5)代入式(28),可得变换式

$$\begin{cases} \beta_a = \alpha + \beta_0 \\ \beta_b = -\frac{1}{2}\alpha + \beta_0 \\ \beta_c = -\frac{1}{2}\alpha + \beta_0 \end{cases} \quad (29)$$

把式(29)代入式(13),可得:

$$K_\chi = 3\beta_0^2 + \frac{3}{2}\alpha^2, \chi \in \{U, I, P\} \quad (30)$$

把式(30)代入式(17),则此时变压器损耗 ΔP_2 为:

$$\Delta P_2 = P_{Fe} + \frac{1}{K} (3\beta_0^2 + \frac{3}{2}\alpha^2) I_N^2 Z_{CU} \quad (31)$$

方式3: 一相负荷轻、两相负荷重。

假设: a相负荷轻, b相负荷重, c相负荷重, 令

$$\begin{cases} \alpha_a = -2\alpha \\ \alpha_b = \alpha \\ \alpha_c = \alpha \end{cases} \quad (32)$$

把式(5)代入式(32),可得变换式

$$\begin{cases} \beta_a = -2\alpha + \beta_0 \\ \beta_b = \alpha + \beta_0 \\ \beta_c = \alpha + \beta_0 \end{cases} \quad (33)$$

把式(33)代入式(13),可得:

$$K_\chi = 3\beta_0^2 + 6\alpha^2, \chi \in \{U, I, P\} \quad (34)$$

把式(34)代入式(17),则此时变压器损耗 ΔP_3 为:

$$\Delta P_3 = P_0 + \frac{1}{K} (3\beta_0^2 + 6\alpha^2) I_N^2 Z_{CU} \quad (35)$$

比较式(23)(27)(31)(35)可知,当总功率一定时,三相负荷不平衡带来的损耗为:

$$\Delta P_3 > \Delta P_1 > \Delta P_2 > \Delta P_0 \quad (36)$$

把式(36)代入式(18),通过分析可知,以上4种实验方式得到的配电变压器效率从低到高的排序为:方式3,方式1,方式2,方式0。

2.2 实现配电变压器效率最大化的治理分析

利用STM32单片机搭建控制模块。通过模块式的机电一体化建构,可以得到配电变压器效率最大化的实现装置,其结构框如图1所示。

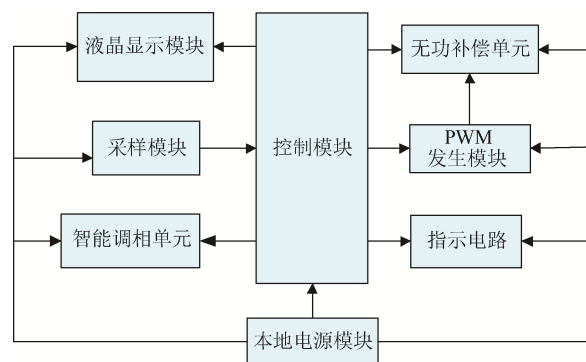


图1 配电变压器效率最大化实现装置框图

Fig. 1 Structure of the device for maximizing efficiency of distribution transformers

图1中,通过实时采样得到的低压配电网系统电力参数被发送到控制系统。控制系统根据预分布算法^[21]做出最优负荷调整策略,并对采集的相关电力参数做FFT变换,结果作为系统保护判

据。系统根据 A/D 采样数据进行三相负荷不平衡度的计算, 并对三相负荷不平衡度做出检测判断。若检测值超出预设值范围, 则基于预分布算法对三相负荷进行调相; 若检测值在预设值范围, 则继续检测中性线电流, 并判断中性线电流是否在零值附近。若中性线电流在设定值范围, 则系统保持当前状态输出; 若否, 则系统发出控制信号给无功补偿模块, 通过无功补偿的方式进一步降低中性线电流使之逼近于零。

大量实验验证结果表明, 采用星形无功补偿器组进行动态分相补偿和投入三角形无功补偿器组进行三相共补微调的方式, 可以有效降低中性线电流^[22], 从而最大化提高配电变压器效率。该控制策略如图 2 所示。

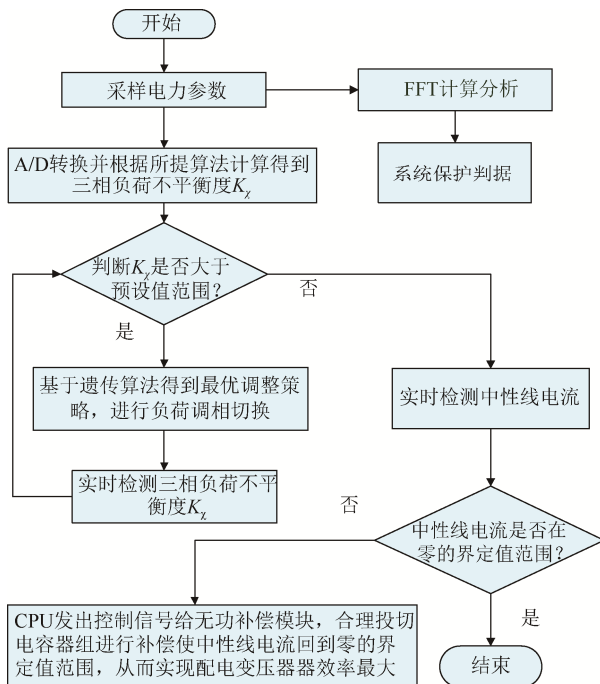


图 2 基于联合机制实现配电变压器效率最大化算法

Fig. 2 Algorithm for maximizing the efficiency of distribution transformers based on joint mechanism

结合式 (19) (20) 并融入基于联合机制实现配电变压器效率最大化算法, 得到实现配电变压器效率的最大化的应用装置, 其工作原理如图 3 所示。

3 实验验证与分析

以伊宁市北环路 40 号配电变压器为例, 取接

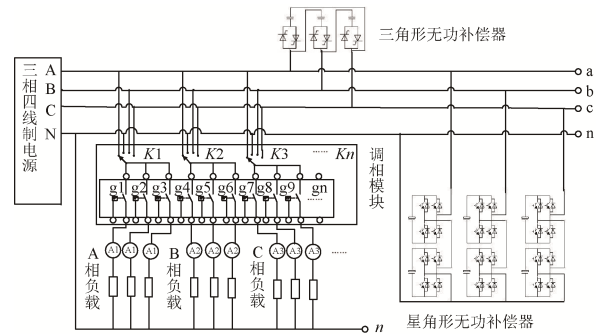


图 3 配电变压器效率最大化实现装置原理

Fig. 3 Principle of the device for maximizing the efficiency of distribution transformers

近上述 4 种实验方式下的运行数据进行分析, 结果如表 1 所示。

表 1 4 种实验方式下的运行参数统计

Tab. 1 Statistics of operating parameters under four experimental methods

方式	实验条件	运行参数			
		$\beta_0/\%$	$K_x/\%$	P_2/kW	$\eta/\%$
0	$I_a=41.76\text{ A}$	26.5	21.2	28.64	98.1
	$I_b=34.72\text{ A}$				
	$I_c=38.16\text{ A}$				
	$I_N=5.60\text{ A}$				
1	$I_a=69.12\text{ A}$	40.3	52.7	38.63	97.2
	$I_b=70.40\text{ A}$				
	$I_c=34.48\text{ A}$				
	$I_N=34.40\text{ A}$				
2	$I_a=92.56\text{ A}$	59.2	110.8	57.30	96.5
	$I_b=105.12\text{ A}$				
	$I_c=58.00\text{ A}$				
	$I_N=43.20\text{ A}$				
3	$I_a=145.60\text{ A}$	91.1	287.3	88.20	94.7
	$I_b=185.84\text{ A}$				
	$I_c=61.92\text{ A}$				
	$I_N=108.80\text{ A}$				

通过实验分析可得到平均负载率与配电变压器出口功率和效率的关系曲线, 如图 4 所示。

对表 1 中三相负荷不平衡度 K_x 做归一化处理并仿真三相负荷不平衡度与配电变压器效率的关系曲线, 结果如图 5 所示。

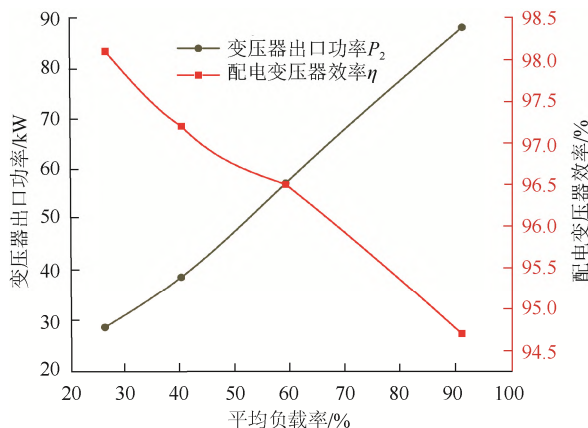


图4 平均负载率与配电变压器出口功率和效率关系

Fig. 4 Relationship curves between average load rate and outlet power and efficiency of distribution transformers

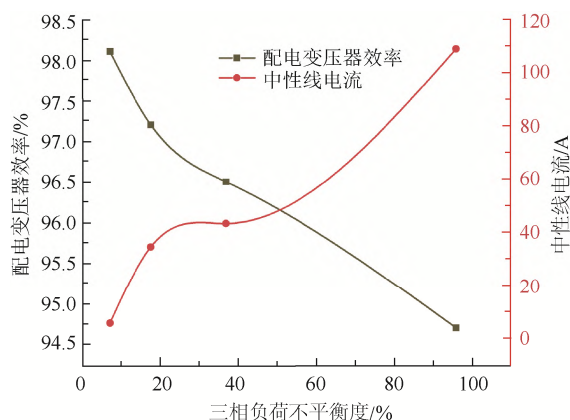


图5 三相负荷不平衡度与配电变压器效率的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between three-phase load imbalance and distribution transformer efficiency

由图4可以看出,平均负载率越大,配电变压器出口功率越大,但配电变压器效率并不一定随之增大,还要考虑三相负荷不平衡度的影响;从图5可看出,三相负荷不平衡度越大,中性线电流越大,配电变压器效率越低。

结合式(20)的分析,针对建立种群的三相负荷不平衡进行实验测试,并比较三相负荷不平衡度 K_x 与中性线电流 I_0 在治理前与治理后的结果,以此来反映变压器效率的改善情况。实验结果如表2至表5所示。

1) 对比表2、表3结果可知,当三相负荷不平衡度低于10%时,宜采用直接补偿方式来降低中性电流,以实现配电变压器效率最大化,即三相负荷不平衡度的预设值范围取9%~10%。

表2 高于平均负载率10%治理前测试结果

Tab. 2 Test results before governance with a load rate 10% higher than the average load rate

变量	实验条件			
	A=B=C	A>B 10% B=C	A>B 10% C<B 10%	A>B 10% C>B 10%
K_x	0%	9.1%	18.2%	8.3%
I_0	0.3 A	1.5 A	2.6 A	1.6 A

表3 高于平均负载率10%治理后测试结果

Tab. 3 Test results after governance with a load rate 10% higher than the average load rate

变量	实验条件			
	A=B=C	A>B 10% B=C	A>B 10% C<B 10%	A>B 10% C>B 10%
K_x	0%	9.5%	14.8%	8.4%
I_0	0.3 A	0.88 A	0.7 A	1.0 A

表4 高于平均负载率20%治理前测试结果

Tab. 4 Test results before governance with a load rate 20% higher than the average load rate

变量	实验条件			
	A=B=C	A>B 20% B=C	A>B 20% C<B 20%	A>B 20% C>B 20%
K_x	1.3%	17.2%	33.3%	17.6%
I_0	0.33 A	3.00 A	5.14 A	2.99 A

表5 高于平均负载率20%治理后测试结果

Tab. 5 Test results after governance with a load rate 20% higher than the average load rate

变量	实验条件			
	A=B=C	A>B 20% B=C	A>B 20% C<B 20%	A>B 20% C>B 20%
K_x	1.3%	16.7%	30.3%	11.5%
I_0	0.33 A	0.88 A	0.91 A	0.92 A

2) 对比表4、表5结果可知,当三相负荷不平衡度高于10%时,应先进行三相负荷的调整使三相负荷不平衡度降到预设值范围,再进行无功补偿把中性线电流降低到零的界定值范围1 A左右,以实现配电变压器效率的最大化。

4 提高配电变压器效率的措施

为实现配电变压器效率的最大化,应考虑以下措施:

- 1) 配电时控制单相负载率在 0.4~0.7 之间。
- 2) 对于变压器平均负载率, 需要采用结合三相负荷不平衡度来综合确定三相负荷的分配策略, 这样才能使配电变压器效率最大。
- 3) 以三相负荷不平衡度为自适应函数, 结合遗传算法和三相不平衡预计算控制策略, 优选取合理负荷的换相开关进行调节。
- 4) 基于联合机制的有功调整与无功补偿相结合的治理策略, 进行负荷动态相序切换和无功补偿。

5 结论

通过对影响配电变压器效率的因素逐一展开分析讨论, 建立了数学分析模型, 提出了三相负荷不平衡度的计算式, 并以此建立了三相负荷不平衡度与配电变压器效率的关系。提出了基于联合机制实现配电变压器效率最大化算法。

实验及案例分析表明: 负载率越大, 配电变压器出口功率越大; 但配电变压器效率不一定越大, 有时反而降低 (主要是由单相负荷接入电源的相序引起); 三相负荷不平衡度越大, 中性线电流就越大, 损耗就越大, 配电变压器效率越低。三相负荷不平衡度的预设值范围为 9%~10%, 给出了提高配电变压器效率的综合举措。

展望: 下一步研究方向为, 优化算法与结构, 实现对三相负荷的预分配调度; 借助云端, 实现信息系统的终端控制, 加入智能动态无功补偿策略, 以有效降低能耗、提高电能利用率。

参考文献:

- [1] 孙绍国, 谷明, 韩瀛, 等. 高校配电变压器负载率分析[J]. 建筑电气, 2018, 37(5): 5-8.
SUN SHAOGUO, GU MING, HAN YING, et al. Analysis of load rates of distribution transformers in colleges and universities[J]. Building Electricity, 2018, 37(5): 5-8(in Chinese).
- [2] 邓嘉翕, 何丽柔, 许琦凡. 10 kV 配电网运行效率分析及投资策略优化应用[J]. 供用电, 2021, 38(3): 31-37.
DENG JIAXI, HE LIROU, XU QIFAN. 10 kV distribution network operation efficiency analysis and investment strategy optimization application[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(3): 31-37(in Chinese).
- [3] 张占卫. 10 kV 电力变压器经济运行分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
ZHANG ZHANWEI. Economic Analysis of economic operation of 10 kV power[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017(in Chinese).
- [4] 牛国轩, 张振宇, 梁宁, 等. 工厂变压器节能技术研究[C]//第五届全国石油和化工电气设计与应用论文大赛论文集. 南京: 中国机电一体化技术应用协会, 2021: 43-49.
- [5] 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, 57(11): 30-36.
AI JINGWEN, ZHANG HUAYING, WANG QING, et al. Study on calculation method of unbalanced factor based on RMS of fundamental current[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(11): 30-36(in Chinese).
- [6] 李哲, 富巍, 董史伟, 等. 配电变压器三相负荷不平衡对变压器损耗影响的实验研究[J]. 电气应用, 2018, 37(2): 54-61.
- [7] 李琳玮, 付艳兰, 黄雄, 等. 配电变压器负载率对损耗的影响[J]. 云南电力技术, 2018, 46(4): 46-49.
LI LINWEI, FU YANLAN, HUANG XIONG, et al. Influence of load factor of distribution transformer on energy loss and economic analysis[J]. Yunnan Electric Power, 2018, 46(4): 46-49(in Chinese).
- [8] 杨大岭. 变压器在民用住宅项目中实际运行负载率分析[J]. 建筑电气, 2021, 40(1): 43-50.
YANG DALING. Analysis on actual operating load rate of transformers used in civilian residence projects[J]. Building Electricity, 2021, 40(1): 43-50(in Chinese).
- [9] 刘科研, 贾东梨, 王薇嘉, 等. 考虑负荷不平衡分布的低压配电网线损实用计算策略[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(6): 81-86.
LIU KEYAN, JIA DONGLI, WANG WEIJIA, et al. Practical calculation strategy for low-voltage network line loss considering unbalanced load distribution[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(6): 81-86(in Chinese).
- [10] 孙俐瑶, 鲜于建川. 基于换相开关的配电变压器三相不平衡治理研究[J]. 电工技术, 2023(1): 38-41.
SUN LIYAO, XIANYU JIANCHUAN. Research on the three-phase unbalance management of the distribution transformers based on commutation switch[J]. Electric Engineering, 2023(1): 38-41(in Chinese).
- [11] 李江, 周铁军, 杨润冰, 等. 三相负荷不平衡自动调

- 节装置在低压配电网中的应用研究[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(1): 30-33.
- LI JIANG, ZHOU TIEJUN, YANG RUNBING, et al. Application research of three-phase load unbalanced automatic regulator in low-voltage distribution network[J]. Techniques of Automation and Applications, 2022, 41(1): 30-33(in Chinese).
- [12] 张喆, 邓思阳, 张晓惠, 等. 低压台区配电三相不平衡无功补偿方法研究[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(4): 103-105.
- ZHANG ZHE, DENG SIYANG, ZHANG XIAOHUI, et al. Three-phase unbalanced reactive power compensation method for low voltage substation area distribution[J]. Microcomputer Applications, 2022, 38(4): 103-105(in Chinese).
- [13] 范荻, 皇甫成, 王丰, 等. 基于 MIT-LXPM 改进遗传算法的配电网时间序列三相不平衡优化调控策略[J]. 智慧电力, 2022, 50(5): 9-16.
- FAN DI, HUANG FUCHENG, WANG FENG, et al. Optimal regulation strategy of three-phase imbalance in time series of distribution network based on MIT-LXPM improved genetic algorithm[J]. Smart Power, 2022, 50(5): 9-16(in Chinese).
- [14] 王杰锋. 基于智能换相策略的三相不平衡治理方法[J]. 电子测试, 2021(5): 107-108.
- WANG JIEFENG. Three-phase imbalance governance method based on intelligent commutation strategy[J]. Electronic Test, 2021(5): 107-108(in Chinese).
- [15] 何俊杰, 柯洁. 基于低压智能塑壳开关的低压台区三相不平衡换相治理方法[J]. 机电工程技术, 2022, 51(6): 268-271.
- HE JUNJIE, KE JIE. Three-phase unbalance commutation control method of low voltage platform area based on low voltage intelligent plastic case switch[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51(6): 268-271(in Chinese).
- [16] 冯平辉, 李健, 杨晓松, 等. 农村配电台区换相开关三相不平衡治理系统的应用[J]. 上海电力学院学报, 2018, 34(3): 297-302.
- FENG PINGHUI, LI JIAN, YANG XIAOSONG, et al. Application of the three-phase unbalanced control system in the rural distribution transformer[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2018, 34(3): 297-302(in Chinese).
- [17] 李炳璋. 配电网变压器负载率智能化分析[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- LI BINGZHANG. Intelligent analysis of transformer load rate in distribution network[D]. Changchun: Jilin University, 2018(in Chinese).
- [18] 温惠, 王同勋, 毛涛, 等. 基于谐波畸变率和负载率的变压器损耗及寿命损失分析[J]. 电测与仪表, 2015, 52(22): 42-48.
- WEN HUI, WANG TONGXUN, MAO TAO, et al. Analysis of the active power and life loss of transformers based on harmonic current distortion and loading rate[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(22): 42-48(in Chinese).
- [19] 周先哲, 古智鹏, 黄雯. 变压器损耗计算方法的研究[J]. 电力需求侧管理, 2013, 15(6): 11-14.
- ZHOU XIANZHE, GU ZHIPENG, HUANG WEN. Research of transformer losses calculation method[J]. Power Demand Side Management, 2013, 15(6): 11-14(in Chinese).
- [20] 邓琨, 孙俊, 魏恩伟, 等. 基于遗传算法优化的三相不平衡多目标控制策略研究[J]. 电气开关, 2022, 60(2): 25-29.
- DENG KUN, SUN JUN, WEI ENWEI, et al. Research on multi-objective control strategy of three-phase imbalance based on genetic algorithm optimization[J]. Electric Switcher, 2022, 60(2): 25-29(in Chinese).
- [21] 张驷阳, 郝思鹏. 基于换相开关的三相不平衡治理[J]. 电气自动化, 2021, 43(2): 98-100.
- ZHANG JIAOYANG, HAO SIPENG. Three-phase unbalanced governance based on phase-change switch[J]. Electrical Automation, 2021, 43(2): 98-100(in Chinese).
- [22] 霍长龙. 基于分布式协同控制技术的分散式无功补偿技术方案研究[J]. 电工技术, 2024(5):101-104.
- HUO CHANGLONG. Study on distributed reactive power compensation technology based on distributed cooperative control technology[J]. Electrical Engineering Technology, 2024(5): 101-104(in Chinese).

收稿日期: 2024-05-15

作者简介:

姚伟(1988—), 男, 讲师, 主要研究方向为信号检测与自动控制、电力系统保护与控制;

刘彦彦(1991—), 女, 助理讲师, 主要研究方向为电力系统自动化、自动化与智能控制;

郭志明(1983—), 男, 高级工程师, 研究方向为电气工程及其自动化、电气设备故障诊断。

通信作者: 刘彦彦