

有载调压配电变压器节能应用研究

李 斌¹, 廖兴万¹, 马留军², 许洪元², 段曦瞳¹

(1. 国家管网集团华南公司, 广东 广州 510620; 2. 江苏金智科技股份有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 华南地区成品油管线输油站的 10 kV 配电变压器运行电压经常处于合格但偏高的状态, 导致其空载损耗大幅上升。分析了少维护有载调压配电变压器节能原理, 设计、制造了基于真空有载调压开关的 S13 型配电变压器, 替换了东莞输油站一台 S9 型配电变压器。实际运行结果表明, 有载调压配电变压器不但可以显著减少其空载损耗, 还能大幅节约负载能耗, 且可以在成品油管输线路的输油站推广应用。

关键词: 成品油管道输送; 配电变压器; 节能; 空载损耗; 负载损耗

Study of application of a distribution transformer with OLTC on energy conservation

LI Bin¹, LIAO Xingwan¹, MA Liu jun², XU Hongyuan², DUAN Xitong¹

(1. PipeChina South China Company, Guangzhou 510620, China; 2. Wiscom System Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstracts: The voltage of distribution transformers of transmission station of refined oil pipelines in Southern China is usually higher than expected although they are up to standard, and so that its no-load losses increase significantly. The principle of energy conservation of distribution transformers with on-load tap changer(OLTC) is analyzed. One S13 distribution transformer with OLTC is designed and produced, and the old S9 distribution transformer in Dongguan oil transmission station is replaced for energy conservation. The comparison of actual operating losses before and after the replacement shows that the on-load regulating of voltage of a distribution transformer can reduce the no-load energy loss of the transformer and the energy loss of its loads, both significantly. The suggestion of application of this kind of OLTC distribution transformer is proposed.

Key words: refined oil pipeline; distribution transformer; energy conservation; no-load loss; load loss

0 引言

由于数量众多, 配电变压器损耗要占到输配电损耗的一半左右。例如, 2018 年全国发电量 6.8 万亿 kW·h, 配电变压器电能损耗约 2 173 亿 kW·h(根据往年数据推算), 占当年三峡发电量 1 016 亿 kW·h 的 2.14 倍。因此, 配电变压器的电能损耗总量巨大, 其节能工作也一直是电气节能的工作重点。而配电变压器节能工作主要从两方面着手: 一是设计、制造和应用更节能的配电变压器, 实践中主要是用新型节能配电变压器

更换老旧的非节能配电变压器, 可以取得良好的节能效果和经济效益^[1-2]; 二是实现配电变压器的经济运行, 通过一系列节能技术, 寻求在运行中降低配电变压器的电能损耗^[3]。但以上文献均没有涉及配电变压器有载调压对其本体节能与负载节能的影响, 而有关配电变压器有载调压的研究, 主要目的也是侧重于解决线路末端的低电压问题, 利用配电变压器有载调压节约配电变压器台区电能消耗的文献比较少见。本文主要分析了配电变压器有载调压节能原理, 基于真空有载调压开关研制了一台新型少维护的有载调

压配电变压器,并用这台新型配电变压器改造了东莞输油站原有的一台 S9 型油浸式 630 kV·A 变压器。运行实践表明,在电压经常偏高的华南地区,通过有载调节配电变压器分接头,不但能够保证电压合格率,还能显著减少变压器本体的电能损耗,明显降低负载的电能损耗。本文的研究成果为配电变压器有载调压技术用于节能应用提供了一个成功案例。

1 变压器有载调压节能原理

1.1 真空有载调压开关

在电网中,主变压器一般都是采用有载调压开关,在运行中带载调节主变压器分接头,以实现电压无功运行控制,保证低压侧母线电压处于调压目标范围内。如现在电网公司普遍采取了逆调压,以防止在夜间轻载时母线电压越上限。然而,有载调压技术在配电变压器领域使用并不广泛,少量的有载调压配电变压器应用的目的主要是解决重载长线路末端负载的低电压问题,而有载调容调压配电变压器还能通过变压器容量的切换兼顾变压器本体节能^[4],但结构也更为复杂,且仅适用于负载系数长期偏低的场合。

从最终用户的角度分析,传统的有载调压开关在配电领域之所以应用较少,原因在于油浸式有载调压开关的触头在切换操作中会产生电弧,从而影响绝缘油的品质。因此,每操作 2 000~4 000 次或每隔 6~12 个月就需要维护一次,检测或更换绝缘油。这样的运维工作量对于大多数使用单位是偏大的,特别是成品油输送管道管线长,覆盖距离远,运维一次将消耗很大的时间成本和人力成本,难以承受。另外,将调压开关专门安装在一个绝缘筒内,用“背包式”绑定在变压器侧面,也增大了变压器体积,增加了设备成本。

近年来,一种在真空开关基础上研制的有载调压开关逐步成熟,而基于这种真空有载调压开关的少维护配电变压器的技术规范也已于 2018 年

发布^[5]。这种少维护有载调压配电变压器的有载调压开关与配电变压器本体寿命相同,平时基本无须维护,从而扫除了有载调压配电变压器应用于节能的最大障碍。

1.2 有载调压配电变压器本体节能原理

变压器的空载损耗,即铁心损耗,是变压器空载运行时由励磁电流在铁心内建立主磁通,并引起磁通发生周期性变化所产生的损耗。空载损耗与所带负荷大小无关,主要与变压器铁心材质、结构和制作工艺等设计制造因素密切相关,也与运行时的主磁通(即运行电压)有关。

对用户使用的一台配电变压器而言,设计制造因素已经确定,而电网电压(即配电变压器高压侧电压)取决于上级电网电压,无法调节。如果是无励磁调压配电变压器,低压侧电压也不可调节,那空载损耗就属于不可控因素,在容量确定后,要想降低变压器的空载损耗通过以下方法:选择能效更高的节能型变压器;根据负载水平选择更合适的容量,使得变压器大部分时间运行在经济运行区间;当有两台配电变压器可并列或分列运行时,选择最经济的运行方式等。而有载调压配电变压器则可以在采取以上节能措施的基础上,通过在线调节配电变压器高压侧线圈的匝数,改变主磁通水平,达到降低配电变压器空载损耗的目的。同时,也能改变低压侧母线电压,使之运行在更合理的区间,既提高了电压合格率,又可降低负载的电能损耗。

根据变压器的工作原理,变压器一次电压与主磁通可由下式表示^[6]

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (1)$$

式中, U_1 为一次侧电源电压有效值; E_1 为一次绕组感应电动势的有效值; f 为电源频率; Φ_m 为主磁通的幅值。

因电源频率波动很小,可以视作固定为 50 Hz 不变,从而可以发现,主磁通的大小和波形主要取决于电源电压。对于配电降压变压器,电源电压处于不可控状态,如果变压器不具备有载调压

功能,那么运行中主磁通将被动随电源电压波动,当铁心出现饱和现象时,主磁通将出现畸变。目前,公共电网普遍采用逆调压策略,因此,即使是负荷处于峰时段,直接接入电网的配电变压器一次侧也会经常处于超过额定电压的高电压状态。此时虽然二次电压仍处于合格范围,但因主磁通增大,变压器的空载损耗将增加。另外,当变压器一次电压超过额定电压后,将引起铁心一定程度的饱和,而饱和将导致变压器空载损耗急剧增加。

当配电变压器实现有载调压后,情况就大不相同。根据式(1),如果在线调节增大了高压侧线圈匝数,那么由于 U_1 和 f 保持不变,主磁通幅值将相应减小,配电变压器的空载损耗亦将减少。这就是有载调压配电变压器实现变压器本体节能的原理。

1.3 配电变压器有载调压负载节能

(1) 静止负载

静止负载主要有电阻性负载、电感性负载和兼具感性、阻性特点的复合型负载。常见负载中,白炽灯、加热器为阻性负载,日光灯为感性负载,而 LED 灯则为复合型负载。这些负载消耗的有功功率和无功功率都与电压二次方成正比。因此,当电压下调时,其直接消耗的有功功率以电压的二次方快速下降,同时无功功率的下降又使得低压线路和配电变压器因无功传输带来的有功损耗得以下降,两者叠加,将显著降低整个变压器台区的有功损耗。

(2) 旋转负载

在成品油管输电领域,工艺所用的低压电动机绝大多数均为异步电动机,冰箱、空调器等办公生活电器的驱动电动机也均为异步电动机。而异步电动机能耗主要由定子铁心损耗、铜耗和机械损耗组成。对于恒定负载,当异步电动机负载系数 $\beta < 0.677$ 时,调低电动机机端电压可以节约电动机能耗^[7]。对于变转矩负载,当负载系数较小时,降低端电压也可降低电动机的总损耗,而且此时因为输出转矩减小,电动机的输入功率也减

小,电动机能效还能进一步得以提高^[8]。输油站大多数电动机处于轻载状态,适当调低运行电压有助于节能。

2 配电变压器有载调压节能案例

2.1 配电变压器有载调压技术改造案例

国家管网公司华南分公司东莞输油站 1# 配电变压器原使用一台 S9 型 630 kV·A 变压器,其负载主要有低压电动机、照明和空调器等。本次技术改造采用新型真空有载调压开关,设计制造了一台同容量的 S13 型少维护有载调压配电变压器,替换原 S9 型无励磁调压配电变压器。

为准确评估有载调压技术改造的节能效果,在配电变压器高低压侧各配置了一台三相多功能电能表,如图 1 所示,以便在线监测改造前后变压器及其负载的电损,为节能效果评估提供依据。

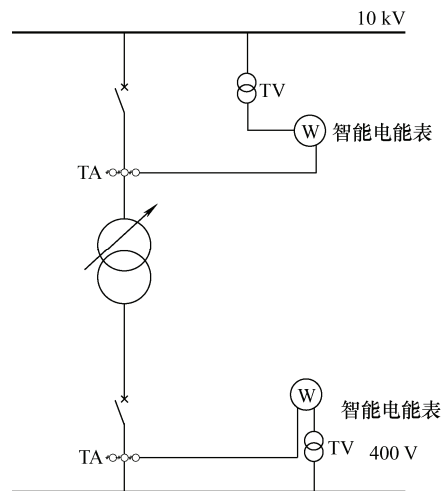


图 1 东莞油库配电变压器一次系统图

Fig. 1 Primary system diagram of distribution transformer in Dongguan oil transmission station

2.2 调压效果与分析

本次改造于 2020 年 5 月 20 日开始,当日完成改造投入运行,图 2 为实测获得的改造前 5 月 19 日电压曲线,其中黄色线为根据当时原无励磁变压器分接头位置(额定位置,对应额定电压比 10 000/400)将实测的高压侧电压归算到低压侧的

A 相电压，蓝色线为低压侧实测 A 相电压，它们之间的压差为变压器内部压降。

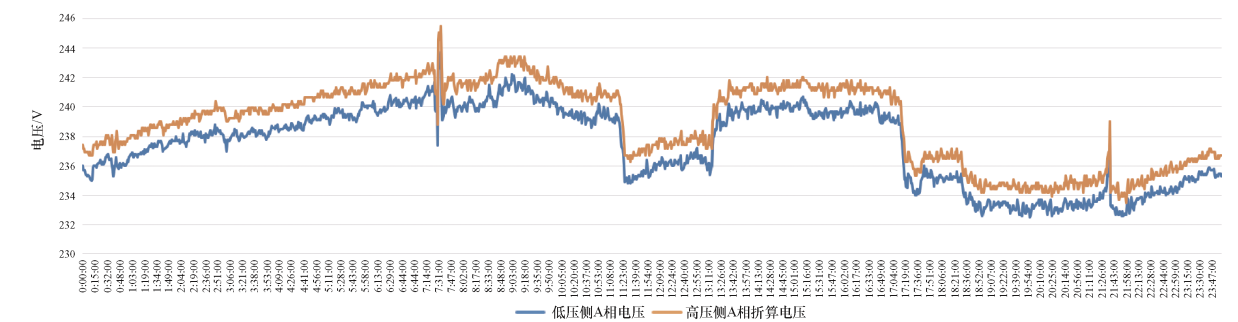


图 2 改造前日电压曲线
Fig. 2 Daily voltage curve before retrofit

图 3 为改造后 5 月 21 日电压曲线，其中黄线、蓝线代表的意义与图 2 相同。明显增大了归算到低压侧的平均压差，即有载调压开关发挥了作用，调低了低压侧运行电压。需指出，有载调压开关是投运日即 5 月 20 日调到 2 档的，5 月 21 日是投运后第二天，从电压曲线上可以看出，整日有载调压开关没有动作，因当天低压侧电压始终处于 2 档区间 210~227 V 范围内，完全合格且满足现场运行要求，按预定调压策略不应动作。

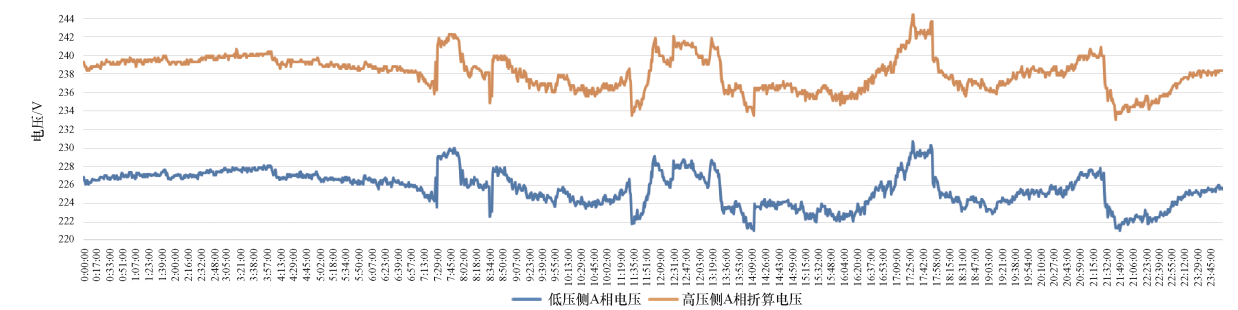


图 3 改造后日电压曲线
Fig. 3 Daily voltage curve after retrofit

2.3 节能效果与分析

本次改造于 2020 年 5 月 20 日开始，当日完成，实测获得了改造前 10 天和改造后 10 天的电度量，如下表所示。

表 改造前后配电变压器台区能耗数据对比			
Tab. Comparison of energy consumption date of distribution transformer station area before and after retrofit			
(单位: kW·h)			
对比期	配电变压器高压侧电度量	配电变压器低压侧电度量	变压器本体消耗电能
改造前 10 天	12 106	11 580	526
改造后 10 天	11 550	11 310	240

由上表可见，变压器本体改造前平均每天消耗电能 52.6 kW·h，改造后平均每天消耗电能 24 kW·h，改造后比改造前平均每天少消耗电能

28.6 kW·h，折算到每年为可节约电能 10 439 kW·h。由于 S9 型和 S13 型配电变压器额定负载损耗相同，而两个对比期内负载运行情况也基本相同，因此，认为上述节能量均来自变压器空载损耗的减少。

而空载损耗的降低来自两个方面：S13 型配电变压器额定损耗的减少和有载调压降低了配电变压器主磁通带来的空载损耗的减少。已知 S9-630/10 配电变压器额定空载损耗为 1.2 kW，S13-630/10 配电变压器额定空载损耗 0.57 kW，因此，对比期内因更换型号配电变压器空载损耗减少 A_1 为

$$A_1=(1.2\times24\times10-0.57\times24\times10)\text{kW}\cdot\text{h}=151.2\text{ kW}\cdot\text{h}$$

(2)

而对比期内因配电变压器有载调压获得了额外的空载损耗节能量 A_2 为

$$A_2 = (526 - 240 - 151.2) \text{ kW} \cdot \text{h} = 134.8 \text{ kW} \cdot \text{h} \quad (3)$$

可以看出, 因有载调压获得的空载损耗节能量已经接近了更换型号获得的节能量, 有载调压对节约配电变压器空载损耗的效果非常明显。

另外, 由于对比期内负载情况基本相同, 变压器低压侧电能表记录的前后电度量之差基本代表了通过有载调压节约的负载电能, 即通过有载调压获得的低压侧负载节电量为改造前负载消耗电能减去改造后负载消耗电能, 由上表数据计算可得为平均每天 $27 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 折算到年节能量为 $9\,855 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 也比较可观。

3 结束语

实践证明, 少维护真空有载调压配电变压器不但可以保证配电变压器台区电压合格率, 还能通过有载调压节约配电变压器运行空载损耗, 减少负载消耗的电能, 对于成品油输送管道输油站等 10 kV 电压直接接入的用电负荷, 可以起到明显的节能效果, 值得推广应用。EA

参考文献

[1] 柯朝俊, 许哲雄. 总拥有法优选配电变压器的探讨[J].

节能, 2011(5): 11-13.

- [2] 张禄亮, 余涛, 曾江, 等. 基于实测数据的变压器节能效益精确测算方法及实例研究[J]. 电气应用, 2010, 29(22): 44-47.
- [3] 胡景生. 变压器经济运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 335-371.
- [4] 刘斌, 岳青, 孙毅卫, 等. 调容调压变压器现状及发展趋势研究[J]. 变压器, 2015, 52(5): 23-28.
- [5] 中国电力企业联合会. 10 kV 少维护有载调压配电变压器技术规范: T/CEC 163—2018[S].
- [6] 汤蕴璆. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020: 37-38.
- [7] 何建平, 张广溢. 异步电动机轻载调压节能技术[J]. 电工技术杂志, 2001, 32(5): 38-40.
- [8] 曾聪. 异步电动机节能控制器的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006: 14-16.

作者简介:



李 斌

李斌(1987—), 男, 工程师, 主要研究方向: 工业企业供配电自动化, 综合能源应用。
(收稿日期: 2020-12-03)