

高压/低压预装式变电站损耗测量方法研究

孔繁婷^{1,2}, 王阳^{1,2}, 杨浩^{1,2}, 陈健^{1,2}, 卢林^{1,2}

(1. 天津天传电控设备检测有限公司, 天津 300300;

2. 天津电气科学研究院有限公司, 天津 300180)

摘要: 高压/低压预装式变电站(简称“箱变”或“箱式变电站”), 它的节能性已经得了广泛的研究, 从元器件的选择到结构的优化, 大量的改进产品涌向了市场。目前检测技术领域没有一套试验方法能对箱式变电站产品的损耗进行测定, 也没有一套评价标准来对箱式变电站产品的节能性进行评价。为了弥补检测领域上的空白, 在箱式变电站损耗测量方法与优化方案等方面做出研究, 并进行了相应的验证。研究与验证的过程中还存在着问题, 以期得到更进一步的解决。

关键词: 高压/低压预装式变电站; 节能; 损耗测量方法

中图分类号: TM50 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed23982

Research on Loss Measurement Method of High-voltage/Low-voltage Prefabricated Substation

KONG Fanting^{1,2}, WANG Yang^{1,2}, YANG Hao^{1,2}, CHEN Jian^{1,2}, LU Lin^{1,2}

(1. Tianjin Tianchuan Electric Control Equipment Test Co., Ltd., Tianjin 300300, China;

2. Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300180, China)

Abstract: High-voltage/low-voltage prefabricated substation is short for “box substation”, its nature of saving energy has been widely researched. The research have been from choosing components to optimizing structure. A great of improved products have swarmed into market. But there is neither a set of method to test loss of box substation nor a set of standard to evaluate in the inspection and testing field. In order to supplement the lack of technique, loss test and optimization methods of box substation were studied and verified. There are some problems in the process of research and verification to be expect to solved in the future.

Key words: high-voltage/low-voltage prefabricated substation; energy conservation; loss test method

“双碳”即碳达峰、碳中和, 2021年首次被写入政府工作报告中, 成为家喻户晓的“热词”。这一概念最早出现在2014年11月12日于北京发布的《中美气候变化联合声明》中, 美国提出2025年计划实现碳达峰。2020年9月, 中国在联合国大会上向世界宣布了2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”的目标。

分析近年电力行业的变压器能效提升计划、全国碳市场正式开放以及国家对企业节能政策的补贴等, 可以得出这一结论: 从国际形势到国家政策, 低碳环保、节能减排是一场不容松懈的攻坚战。电力行业一直在低碳环保、节能减排的方向上不断研究与探索。新能源发电、高压输电技术、变压器的能效提升、变频器的节能认证等,

无论是发输电领域还是变配电领域, 都在积极研究节能问题。

高压/低压预装式变电站(简称“箱变”或“箱式变电站”)是一种将高压开关设备、配电变压器和低压开关设备、低压补偿设备按照一定接线方式组成的配电终端设备^[1]。随着城乡发展电网不断扩容, 箱变的装机容量也在不断增加。它作为电网配电环节的中坚力量, 不仅需要做到应用安全便捷、运行稳定无误, 更重要的是还要足够节能环保^[2]。近几年, 箱变的节能性研究越来越多, 从元器件的选择到结构的优化, 大量的改进产品涌向了市场。例如, 有的箱变选择节能型配电变压器以求达到节能效果^[3]; 有的箱变简化低压补偿回路, 选择智能电容器作为补偿元器件; 还有

基金项目: 天津电气院技术预研项目(JC2021ZL001)

作者简介: 孔繁婷(1988—), 女, 硕士, 高级工程师, Email: cherrykey0722@sina.com

的箱变优化外壳设计方案,取代风扇散热^[4]。因此,市场存在着各种改进的箱变产品,但目前在检测技术领域没有一套成熟的试验方法来对箱变产品的损耗进行测定,也没有一套评价标准来对箱变节能性进行认证。针对以上存在的问题,本文将围绕着解决箱式变电站损耗测量方法及优化方案两个方面进行研究与讨论,最终制定一套合理的试验方案对箱变产品的损耗进行测定。

1 损耗测量方法与优化方案

1.1 概述

箱式变电站的损耗主要来源包括变压器、低压室及低压连接线、高压室及高压连接线、辅助/控制回路等4个部分。先对箱变进行温升试验,待箱变温升达到稳定时,测量箱变的损耗。箱变的功能单元、元器件众多,不同单元需要逐一分析。

变压器损耗作为箱变损耗的主要部分,需要精准考察。变压器损耗包括负载损耗和空载损耗两部分^[5]。变压器的负载损耗受环境温度影响较大,测量得到的负载损耗需要折算到参考温度下,因此认为变压器不需要与箱变其他功能单元一样待温升稳定时进行损耗测量。而箱变的高压室、低压室以及辅助/控制回路的损耗测量要在温升稳定后进行。

低压室将变压器低压侧脱开,低压连接线短路,低压连接线的短路点要尽可能地选择靠近变压器。低压室配电回路试验电源与低压开关设备出线端连接,主回路电流为受试变压器的低压侧额定电流,应对低压室补偿回路通额定电压进行试验,所有补偿回路电容均处于投入的工作状态。

高压室试验电源与高压开关设备的进线端子连接,高压开关设备应通受试变压器高压侧总损耗电流进行温升试验(因为要弥补变压器的空载损耗,所以要通总损耗电流进行试验)。变压器室的散热会影响高压室和低压室的试验结果,所以变压器不进行温升试验的考察,要与高压室、低压室同时进行试验。

变压器、高压开关设备及高压连接线、低压设备及低压连接线的温升试验同时进行^[6],试验接线图如图1所示,当各部分均达到温升稳定后,方可进行箱变各部分损耗的测量。

以上是损耗测量的一个总体方案,下面就不同单元的试验方案具体实施及优化进行详细描述。

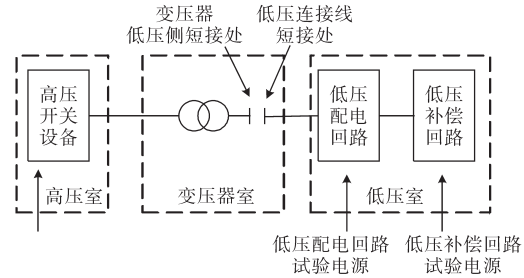


图1 温升试验示意图

Fig.1 Diagram of temperature rise test

1.2 变压器损耗测量方法与优化方案

变压器的损耗包括空载损耗和负载损耗两部分,试验均选在变压器的主分接上进行。

空载损耗反映了箱变在网不运行时变压器损耗。变压器长久在网通电即会产生损耗,是反映变压器节能性的重要参考指标。试验测量方法是将变压器高压侧断开,低压侧施加额定电压,用功率分析仪测得的有功功率即为空载损耗。

负载损耗是箱变带负载运行时所产生的损耗,受环境温度影响比较大,因此其测定值要折算到参考温度下计算负载损耗值,这样的数据才具有比较价值。试验测量方法是:将变压器低压侧短接,高压侧施加额定电流,用功率分析仪测得的有功功率即为负载损耗。因为变压器负载损耗需要折算,所以认为变压器不需要同箱变其他功能单元一起进行温升试验后再进行损耗测量。变压器的温升试验要达到稳定需要的时间较长,采用这种折算的方法不但提高了试验的准确性,同时还提高了试验的效率。

负载损耗的折算步骤如下:

1) 负载损耗测量温度下的高压绕组与低压绕组值 R_2 根据下式进行计算:

$$R_2 = R \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_1} \quad (1)$$

式中: R 为冷态绕组测量值, Ω (高压)/ $m\Omega$ (低压); θ_1 为测量冷态绕组时的温度, $^{\circ}\text{C}$; θ_2 为测量负载损耗时的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2) 参考温度下的高压绕组与低压绕组值 R_r 根据下式进行计算:

$$R_r = R \frac{235 + \theta_r}{235 + \theta_1} \quad (2)$$

式中: θ_r 为参考温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

3) 负载损耗测量温度下的附加损耗 P_{a2} 根据下式进行计算:

$$P_{a2} = P_2 - \sum I_e^2 R_2 \quad (3)$$

式中: P_2 为折算到额定电流下有功功率,kW; $\sum I_e^2 R_2$ 为负载损耗测量温度下的电阻损耗之和(高压和低压),kW。

4)参考温度下附加损耗 P_{ar} 根据下式进行计算:

$$P_{ar} = P_{a2} \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_r} \quad (4)$$

5)参考温度下负载损耗 P_r 根据下式进行计算:

$$P_r = \sum I_e^2 R_r + P_{ar} \quad (5)$$

式中: $\sum I_e^2 R_r$ 为参考温度下的电阻损耗之和(高压和低压),kW。

1.3 低压室及低压连接线损耗测量方法与优化方案

低压连接线损耗不可忽略,选择的处理方法是将它与低压室看做一个整体同时进行测量。

低压配电回路的温升方案选择。不同箱变低压配电回路不尽相同,不同的温升方案也会影响到损耗测量结果。通常情况下有两种温升方案可供选择。方案1采用极值法进行温升试验,将每一条支路都通额定电流,直至达到主回路总电流为止。这种温升方案做到了对支路开关的发热量极限值考察,但通常支路电流的总容量都比较大,这种温升方案只能考察很少一部分回路的损耗。方案2采用电流平均分配法进行温升试验,将总电流平均分配到每条支路上,每条支路都进行温升试验,这种方案虽然可以测得每条支路的损耗,但每条支路的试验电流数值都很低,无法反映真正的发热情况,因此这种状态下发热情况对损耗的影响是不准确的。以630 kV·A箱式变电站为例,对比两种温升方案,结果如表1所示。从表1能清楚地看到方案1考察的支路数过少,而方案2支路的电流值过低。

表1 两种温升方案对比

方案	额定电流/A				
	1分支	2分支	3分支	4分支	5分支
	630	400	400	400	400
方案1 电流/A	630	280	/	/	/
方案2 电流/A	182	182	182	182	182

备注:主回路额定电流910 A

分析以上两种方案的不足,本文提出一种比较合理的温升方案:温升发热主要由电阻引起,因此在温升试验前可以先测定各支路的回路电阻值,然后选定回路电阻值最大的支路,该支路的温升试验电流值为额定电流值×0.8(0.8为分散

系数);再选定回路电阻值次大的支路,该支路的温升试验电流值为额定电流值×0.8;以此类推,直至总电流数达到主回路额定电流值为止。这种优化方案优点有两个:1)选择使用分散系数,在保证发热的前提下降低了一定的温升电流值,增加了通流回路的支路数;2)以回路电阻值的大小作为参考依据,从大到小依次选择通流支路,使得试验更有目的地考察了发热量更高、损耗更大的支路。低压补偿回路保证每路电容器均在正常投入的情况下进行温升试验并且测量损耗值。

损耗的测量。理论上温升稳定时立即测量损耗,但测量设备的敷设需要打开箱变的门,测量设备的调试又需要一定时间,这个时间差会使低压室的温度值降低,损耗测量值也降低,这样得到的结果不够准确。为了解决这个问题,本文采用的方法是提前将功率分析仪安装调试好,电压探头测量低压室出线端电压值,电流钳测量低压室出线端电流值,功率分析仪测量电压、电流、有功、无功等值,其有功功率则为损耗值。低压连接线处采用的是短接处理,因此出线端的测量值则为损耗值。这种方法还可以实时监测每一时刻的损耗变化情况,测量结果的可信度更高。

采用上述的试验方案进行试验验证,实测一个630 kV·A的箱式变电站的低压室损耗数据,如图2所示。图2a为温升试验开始时的损耗数据,图2b为温升试验结束时的损耗数据。试验进行6 h,每1 h的损耗值均可以监测到,从数据角度分析,温度的升高确实会影响到损耗值。

1.4 高压室及高压连接线损耗测量方法与优化方案

高压连接线的损耗同低压连接线的损耗一样,是不可忽略的,选择的方法也相同,高压连接线的损耗与高压开关设备损耗一同测量。

高压室温升方案。高压室及高压连接线在做温升试验时为了保证变压器发热的影响,变压器与高压室一同进行温升试验,但是不对变压器的温升进行考察。高压室的试验电源与高压开关设备的进线端子连接,为了补偿变压器的空载损耗,高压回路需要通受试变压器高压侧总损耗电流进行温升试验,总损耗电流采用下式计算:

$$I_{test} = I_n \times \sqrt{(P_0 + P_r)/P_r} \quad (6)$$

式中: I_n 为高压侧额定电流; P_0 为空载损耗。

此时的总损耗要采用变压器折算后的负载损耗进行计算。变压器总损耗电流比高压开关设备

Uover:=====	U4: 10U
Iover:=====	I4: 500W
Urms4 0.563 U	Pc1 Error
Irms4 0.9146kA	Time1
Urms5 0.466 U	U-pk1 -0.54 U
Irms5 0.9116kA	I-pk1 0.18 A
Urms6 0.473 U	I-pk1 -0.18 A
Irms6 0.8964kA	CfU1 Error
P4 0.365kW	CfI1 Error
P5 -0.133kW	FFU1 Error
P6 0.361kW	FFI1 Error
P2B 0.232kW	Z1 Error
Q2B 0.766kvar	Rs1 Error
λ2B 0.2947	Xs1 Error
η -0 F	Rp1 0.00 n
P5 -0.133kW	Xp1 Error
Waiting 1127 Trend	2021/06/02 10:03:30

(a)温升试验开始时的损耗数据

Uover:=====	U4: 10U
Iover:=====	I4: 500W
Urms4 0.563 U	Pc1 Error
Irms4 0.9157kA	Time1
Urms5 0.467 U	U-pk1 -0.50 U
Irms5 0.9096kA	I-pk1 0.01 A
Urms6 0.470 U	I-pk1 -0.32 A
Irms6 0.9045kA	CfU1 Error
P4 0.372kW	CfI1 Error
P5 -0.125kW	FFU1 Error
P6 0.367kW	FFI1 Error
P2B 0.240kW	Z1 Error
Q2B 0.762kvar	Rs1 Error
λ2B 0.3128	Xs1 Error
η -0 F	Rp1 0.00 n
P5 -0.125kW	Xp1 Error
Waiting 9042 Trend	2021/06/02 15:54:07

(b)温升试验结束时的损耗数据

图2 低压侧损耗试验数据

Fig.2 Loss data for low-voltage side

的额定电流低很多,因此高压室的发热量很低,损耗基本产生于线路损耗。

损耗的测量。试验在变压器低压侧进行短接,直接导致提前在高压开关设备出线端敷设好的功率分析仪测量的是变压器、高压连接线和高压开关设备三部分总的损耗数据。想要得到高压室及高压连接线单独的损耗值有两种实现方案。方案1:温升稳定后,迅速开门拆线,将高压连接线短接,然后采用功率分析仪测量的有功功率即为高压室及高压连接线损耗值;方案2:在高压连接线处再敷设一套功率分析仪进行功率测量,此处测量得到的有功功率与高压开关设备出线端测量得到的有功功率作差即可得到损耗值。

选择630 kV·A的箱式变电站对以上两种方案进行了验证,并且对结果进行了比较。图3为采用方案1进行测量得到的高压室及高压连接线的损耗数据,损耗值为50.3 W。图4为采用方案2进行测量得到的高压室及高压连接线的损耗数据。图4a中高压开关设备进线端功率为6 137.2 W,图4b中高压开关设备出线端功率为6 086.3 W,计算得到高压室及高压连接线的损耗为50.9 W。从数据看出两种方案结果相差无几,主要原因是

变压器总损耗电流比高压开关设备的额定电流低很多,高压室的发热量很低,所以开门散热对损耗影响相对较低。从数据中也可以看出,高压侧的损耗本来就比较低,因此为了结果更加准确,在试验设备充足的前提下,选择方案2会使试验过程更加便捷,效率更高,结果更准确。

Uover:=====	U4: 10U
Iover:=====	I4: 500W
Urms4 0.563 U	Pc1 Error
Irms4 0.9146kA	Time1
Urms5 0.466 U	U-pk1 -0.54 U
Irms5 0.9116kA	I-pk1 0.18 A
Urms6 0.473 U	I-pk1 -0.18 A
Irms6 0.8964kA	CfU1 Error
P4 0.365kW	CfI1 Error
P5 -0.133kW	FFU1 Error
P6 0.361kW	FFI1 Error
P2B 0.232kW	Z1 Error
Q2B 0.766kvar	Rs1 Error
λ2B 0.2947	Xs1 Error
η -0 F	Rp1 0.00 n
P5 -0.133kW	Xp1 Error
Waiting 1127 Trend	2021/06/02 10:03:30

图3 高压室损耗试验数据(方案1)

Fig.3 Loss data for high-voltage side(scheme 1)

Uover:=====	U4: 10U
Iover:=====	I4: 500W
Urms4 0.563 U	Pc1 Error
Irms4 0.9157kA	Time1
Urms5 0.467 U	U-pk1 -0.50 U
Irms5 0.9096kA	I-pk1 0.01 A
Urms6 0.470 U	I-pk1 -0.32 A
Irms6 0.9045kA	CfU1 Error
P4 0.372kW	CfI1 Error
P5 -0.125kW	FFU1 Error
P6 0.367kW	FFI1 Error
P2B 0.240kW	Z1 Error
Q2B 0.762kvar	Rs1 Error
λ2B 0.3128	Xs1 Error
η -0 F	Rp1 0.00 n
P5 -0.125kW	Xp1 Error
Waiting 9042 Trend	2021/06/02 15:54:07

(a)高压侧进线端测量数据

Uover:=====	U4: 10U
Iover:=====	I4: 500W
Urms4 0.563 U	Pc1 Error
Irms4 0.9157kA	Time1
Urms5 0.467 U	U-pk1 -0.50 U
Irms5 0.9096kA	I-pk1 0.01 A
Urms6 0.470 U	I-pk1 -0.32 A
Irms6 0.9045kA	CfU1 Error
P4 0.372kW	CfI1 Error
P5 -0.125kW	FFU1 Error
P6 0.367kW	FFI1 Error
P2B 0.240kW	Z1 Error
Q2B 0.762kvar	Rs1 Error
λ2B 0.3128	Xs1 Error
η -0 F	Rp1 0.00 n
P5 -0.125kW	Xp1 Error
Waiting 9042 Trend	2021/06/02 15:54:07

(b)高压侧出线端测量数据

图4 高压室损耗试验数据(方案2)

Fig.4 Loss data for high-voltage side(scheme 2)

1.5 辅助/控制回路损耗测量方法与优化方案

辅助/控制回路不需要进行温升试验,损耗测量有两种方案可供选择。方案1:找到全部辅助/控制回路的一个公共取电端,然后给定电压,用功率分析仪测量损耗值。方案2:高压室、低压室的辅助/控制回路单独测量,然后相加得到辅助/控制回路的损耗。两种方案的区分不大,但原则是要将全部辅助/控制回路的损耗都进行测量。采用方案1同样对上述630 kV·A箱变的辅

助/控制回路的损耗进行了测量,测量结果如图5所示。

Normal Mode		Uover:=====	U3: 300Vrms
		Iover:=====	Integ:Reset
		Element1	Element2
Voltage	300Vrms	300Vrms	300Vrms
Current	500mA/rms	500mA/rms	500mA/rms
U [V]	381.859	379.574	382.086
I [A]	0.45205	0.08376	0.06785
P [W]	10.766	5.209	-0.041
S [VA]	172.620	31.793	25.924
Q [var]	-172.284	31.364	-25.924
A [°]	0.06237	0.16385	-0.00157
φ [°]	86.424	80.570	90.090
f [Hz]	49.996	76.198	49.999
f1 [Hz]	62.931k	147.31k	136.80k
U+pk[V]	569.129	562.833	569.294
U-pk[V]	-567.508	-560.792	-570.762
I+pk[A]	1.72715	0.76032	0.70734
I-pk[A]	-1.07567	-0.72053	-0.58869
Cf [°]	1.490	1.483	1.494
Cf1 [°]	4.149	9.077	10.425
Pc [W]	10.768	5.216	-0.041
			15.985

图5 辅助/控制回路损耗试验数据

Fig.5 Auxiliary and control loop loss test data

1.6 其他

回路电阻值作为其他试验的参考值,它的测量值也受到环境温度的影响。为了得到的数据更加有参考意义,要将测量值折算到参考温度20℃下进行电阻值的比较,这样得到的比较结果更加客观。

2 思考与总结

本文比较全面地对箱变的损耗测量方法进行了分析、比较与优化处理,提出了一套系统的试验方法。首先,测量低压侧各个回路电阻值并按参考温度进行折算。然后,测量变压器空载损耗和负载损耗,负载损耗按照变压器的参考温度进行折算。最后,对高压室、变压器室、低压室同时进行温升试验。高压室与变压器室相连进行温升试验并且测量高压室输入、输出两端的有功功率,相减即为高压室损耗。低压室采用前文所述优化的温升方案进行试验并且测量输出端有功功率,即为低压室损耗。辅助/控制回路不需要进行温升试验,单独给控制电测量损耗。各部分测量完成后,损耗数据相加即为箱变总损耗。采用该试验方法可以高效准确地得到箱变的损耗值,是掌握判定箱变节能性的最直接的数据,为箱变节能性认证提供了重要的数据支撑。试验方法具有一定的普适性,对各种类型、容量的箱变均适用。文中也对试验方法的可行性进行了验证,得到了预期的数据结果。

在试验方法的研究过程中,还存在着各种问题引起了一些思考,做出总结如下:

1)如果低压补偿回路只由电容器组成,那么这部分的损耗能否按照损耗角正切值乘以电容

器容量来计算获得?如果不进行低压补偿回路的带电测试,试验会更加安全。

2)试验站的试品都是未装有计量单元的箱式变电站,但真正装机到配电终端的箱式变电站都是装有计量单元的,计量单元的损耗和测试又是如何界定的?

3)随着试验方法的确定,与之相应的评价方案也是值得思考的,综合评价损耗总值或者损耗占比哪种方法更加合理呢?

以上问题是目前箱变节能性研究尚未解决的问题,有待在未来的研究中得到解决。

参考文献

- [1] 邓凯. 预装式变电站在电力行业的运用[J]. 低碳世界, 2019, 9(11):111-112.
Deng Kai. Application of prefabricated substation in power industry[J]. Low Carbon World, 2019, 9(11):111-112.
- [2] 王松. 基于大数据技术的变电站损耗分析研究[J]. 计算机应用, 2021, 40(6):38-41.
Wang Song. Research on substation loss analysis based on big data technology[J]. Computer Applications, 2021, 40(6):38-41.
- [3] 姚宗涛, 马崇伟, 吉庆文, 等. 一种基于自耦原理的农网低电压补偿变压器[J]. 电气传动, 2021, 50(17):38-42.
Yao Zongpu, Ma Chongwei, Ji Qingwen, et al. A low voltage compensation transformer for rural power network based on the principle of auto coupling[J]. Electric Drive, 2021, 50(17):38-42.
- [4] 宋爽. 预装式变电站的发展现状和技术对比[J]. 新型工业化, 2020, 10(4):17-22.
Song Shuang. Development status and technology comparison of prefabricated substation[J]. The Journal of New Industrialization, 2020, 10(4):17-22.
- [5] 国家市场监督管理总局/国家标准化管理委员会. GB 20052—2020 中国标准书号[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation/Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 20052—2020 Chinese standard book number[S]. Beijing: China Standard Press, 2020.
- [6] 国家市场监督管理总局/国家标准化管理委员会. GB/T 17464—2020 中国标准书号[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation/Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 17464—2020 Chinese standard book number[S]. Beijing: China Standard Press, 2020.

收稿日期:2021-09-15

修改稿日期:2021-12-06