750kV 可控并联电抗器本体感应电压试验装置研究

温定筠　张秀斌　陈宏刚

（国网甘肃省电力公司电力科学研究院，兰州　730050）

摘要　可控并联电抗器能够在输电线路受到扰动时快速投入，适合于大潮流超高压输电线路无功补偿。感应电压试验是可控并联电抗器的一项重要试验，试验装置参数的选择对试验成功具有决定性的影响。本文通过对750kV可控并联电抗器本体感应电压试验装置的研究，确定了试验装置各项参数并通过试验进行了验证，对电抗器本体感应电压试验消耗的有功功率和本体感应电容进行了估算和试验验证。

关键词：可控并联电抗器；感应电压试验；有功功率；等效电容

Induction Voltage Test Device Research on 750kV Controllable Shunt Reactor

Wen Dingjun　Zhang Xiubin　Chen Honggang

(State Grid Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730050)

Abstract　Controllable shunt reactor can be put into operation quickly when the transmission line is disturbed, particularly suitable for reactive power compensation for high power flow EHV transmission lines. Induced voltage test is an important test of controllable shunt reactor, test parameters have a decisive influence on the test. In this paper, induced voltage test of 750kV controllable shunt reactor is studied, parameters of the test device is verified. Active power and inductance capacitance of the test is estimated and verified.

Key words：controllable shunt reactor；induced voltage test；active power；equivalent capacitance

可控并联电抗器[1-5]是能够实现容量快速可调的并联电抗器，基本作用是抑制工频和操作过电压，因其具有容量快速可调的特点，因此输电线路遇到扰动以至负荷跳闸时，能够立即投入全容量，防止电压失稳，保障系统安全，特别适合大潮流的超、特高压输电线路无功补偿，可替代静止无功补偿设备，目前已在 750kV 超高压电网中应用。

感应电压试验能够有效地反应设备内部绝缘状况，是可控并联电抗器交接试验及诊断性试验中极为重要的大型试验项目，设计参数合理的试验装置，才能有效地完成试验。

1　750kV 可控并联电抗器原理及参数

750kV 可控并联电抗器采用交流有级可控型式，分 25%、50%、75%、和 100%共 4 级调节，除本体外还包括二次侧低压旁路断路器及其操作机构、晶闸管控制装置及隔离开关等部分，原理如图 1 所示。

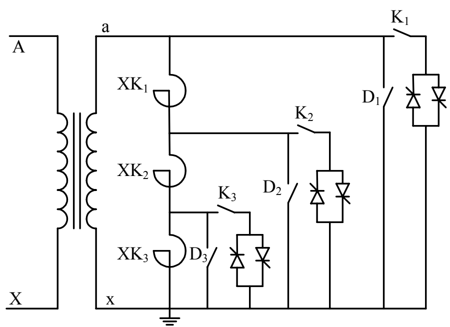

图 1　可控高抗原理示意图

图 1 中 AX 为一次绕组，ax 为二次绕组，二次绕组短路时，容量为 100%，Xk_1、Xk_2、Xk_3 为低压侧小电抗，并接其两侧的双向晶闸管及断路器控制其投退，通过三台小电抗投退的组合可控并联电抗器可以分别实现 25%、50%和 75%的容量。当双向

晶闸管工作在全开通或全闭锁两种极限状态，电流波形不发生畸变，无谐波，不需补偿绕组和滤波装置，即使二次控制晶闸管系统发生故障，无法正常工作，也可手动调节断路器来进行容量调节，结构简单、可靠性高。

现场感应电压试验只是针对本体进行，750kV 可控并联电抗器本体为三相分体结构，其主要参数见表 1。

表 1　750kV 可控并联电抗器主要参数

项目	参数
型号	BKDFPYT-100000/750
额定容量/Mvar	100
额定频率/Hz	50
一次绕组额定电压/kV	$800/\sqrt{3}$
一次绕组额定电流/A	216.5
二次绕组额定电压/kV	40
一次绕组额定电流/A	2500
冷却方式	ONAN/ONAF/OFAF

2　感应电压试验原理及装置

750kV 可控并联电抗器感应电压试验参考 GB1094.3《电力变压器　第三部分　绝缘水平和绝缘试验和外绝缘空气间隙》，试验时，试验装置输出一定频率的试验电压至低压绕组，同时在高压绕组感应出相应幅值的试验电压，原理如图 2 所示。

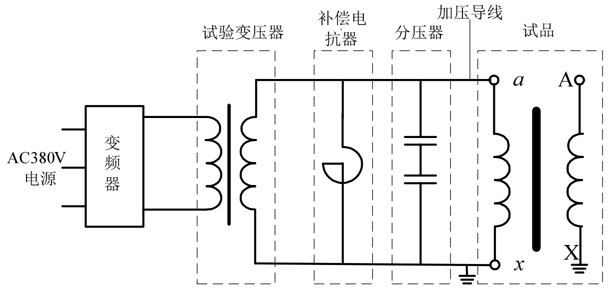

图 2　感应电压试验原理图

试验装置主要包括变频器、试验变压器、补偿电抗器、分压器及相应的加压导线。变频器提供合适频率的试验电压；试验变压器将试验电源输出电压变换为较高幅值的试验电压，并通过加压导线将试验电压施加至试品的低压绕组端子；补偿电抗器与试品并联，提供感性无功从而补偿容性无功，从而补偿容性电流。为了防止试验时励磁电流过大，试验电压的频率应大于试品的额定频率，通常为工频的两倍及以上，现场试验中，多选择 100～250Hz。试验中，变频器只能输出有功功率，因此试验回路中感性无功和容性无功应达到完全平衡。

3　试验装置参数

3.1　变频器

变频器的主要参数包括，输入电压、输出电压、输出频率及额定容量。输入电压为交流 380V，输出电压为 0~400V 可调，输出频率为 0~350Hz 连续可调，额定容量需要根据试验回路消耗的有功功率确定，试验回路消耗的有功功率主要是可控并联电抗器本体的铁心损耗，包括磁滞损耗和涡流损耗两部分。可以根据额定电压、额定频率下的空载损耗，通过变压器试验经验公式来估算：

$$P=\left(\frac{f_{\mathrm{s}}}{f_{\mathrm{n}}}\right)^{m}\left(\frac{B_{\mathrm{s}}}{B_{\mathrm{n}}}\right)^{n}P_{0} \tag{1}$$

式中，f_{n} 为额定频率，50Hz；f_{s} 为试验频率；B_{n} 为额定电压和频率下的磁通密度；B_{s} 为试验时的磁通密度；m、n 为系数，对于热轧硅钢片为 1.3、1.6，冷轧硅钢片为 1.6、1.9。

根据电磁感应定率，B_{s} 和 B_{n} 有如下关系：

$$B_{\mathrm{s}}=k\frac{f_{\mathrm{n}}}{f_{\mathrm{s}}}B_{\mathrm{n}} \tag{2}$$

式中，k 为试验电压的倍数。

目前可控并联电抗器使用的硅钢片都是冷轧硅钢片，因此试验时消耗的有功功率可以用下式表示：

$$P=\left(\frac{f_{\mathrm{s}}}{f_{\mathrm{n}}}\right)^{1.6}\left(k\cdot\frac{f_{\mathrm{n}}}{f_{\mathrm{s}}}\right)^{1.9}P_{0}=k^{1.9}\left(\frac{f_{\mathrm{n}}}{f_{\mathrm{s}}}\right)^{0.3}P_{0} \tag{3}$$

可见，有功功率与试验电压成正比关系，与试验频率成反比关系。因此，应尽可能提高试验频率，以降低试验电源有功功率消耗，最高试验电压为额定电压的 1.7 倍，频率为 100～250Hz，据此估算，试验时消耗的最大有功功率为空载损耗的 1.69～2.23 倍。出厂试验时，额定电压下空载损耗为 35.86kW，据此，可以估算出感应电压试验时，试验回路需要的有功功率为 60.6~80kW。

考虑到经验公式估算的偏差，及试验装置自身损耗的有功功率，选择变频器额定功率时应留出至少 25%的裕度，因此变频器额定功率应大于 100kW。

3.2　试验变压器

试验变压器的主要参数包括输入电压、输出电压和额定容量。输入电压与变频器的输出电压相匹配，通常选择400V。

输出电压则与可控并联电抗器的二次绕组试验电压相关。试验时，一次绕组试验电压最高应达到$1.7U_{\mathrm{m}}/\sqrt{3}$，二次绕组施加的试验电压则为二次绕组额定电压的1.7

倍，即68kV，因此额定输出电压应大于68kV。

试验变压器的额定容量应与变频器的额定容量相同，即应大于100 kW。

3.3 补偿电抗器

电抗器主要用途是提供试验所需的无功功率。试验中，与被试可控并联电抗器并联。

电抗器的主要参数包括额定电压、额定电感及额定容量。额定电压的选择原则与试验变压器额定输出电压的选择原则相同，应大于可控并联电抗器二次绕组额定电压的1.7倍，即大于68 kV。

额定电感应与可控并联电抗器的等效电容相适应，确保试验电压在100～250Hz频率范围内。额定容量应不小于试验回路需要的无功功率。

可控并联电抗器的等效电容通过变压器的经验公示来估算：

$$C_T = C_L + k^2 C_H \quad (4)$$

式中，C_L为二次绕组入口电容；C_H为一次绕组入口电容；k为一、二次绕组变比。

实际的入口电容很难直接测量，因此C_L采用出厂试验二次绕组对地的电容值来替代，C_H采用出厂试验一次绕组对地的电容量来替代。据此计算得到等效电容为0.61μF，补偿电抗器的额定电感应在0.74~4.2H范围内。

回路的无功功率可以通过下式计算，为

$$Q_C = \omega\left(C_L + k^2 C_H\right)U_L^2 = 2\pi f C_T U_L^2 \quad (5)$$

式中，U_L为低压侧电压。

经计算无功功率应在1771~4428kVar范围内，分别与不同额定电感的补偿电抗器对应，不同额定电感的补偿电抗器额定容量见表2。

表2 不同额定电感补偿电抗器额定容量

额定电感/H	最小额定容量/kVar
1	3612
2	2554
3	2085
4	1807

4 试验实践

选择试验装置参数如表3所示。

表3 试验装置参数

项目	额定电压	额定电感	额定容量
变频器	输入380V 输出0~400V	/	200kW
试验变压器	输入400V 输出70kV	/	200kW
补偿电抗器	70kV	3H	2100kVar

A相试验过程数据记录见表4。

表4 A相试验过程数据

试验电压/kV	变频器输出电压/V	变频器输出电流/A	试验电压频率/Hz
40	235	183	136
60	334	250	136
68	344	257	136

B、C相试验过程数据与A相基本相同，三相全部通过试验。根据数据计算，可控并联电抗器本体的等效电容为0.457μF，消耗的无功功率最大为1805kVA，消耗的有功功率最大为88.4kW。

5 结论

1）试验装置中变频器、试验变压器、补偿电抗器参数均能够满足750kV可控并联电抗器本体感应电压试验的需要。

2）可控并联电抗器本体感应电压试验消耗的有功功率估算值较实际值偏差较小，偏小10%。

3）可控并联电抗器本体等效电容估算值较实际值偏差较大，偏大30%。

参考文献

[1] OKABE S,TERANISHI M T, ISHIKAWA M, et al. An electric model of gas-insulated shunt reactor and the analysis of re-ignition surge voltages [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2): 378-386.

[2] 杜宁,关永刚,张景升,等.真空断路器开断并联电抗器的三相建模[J].高压电器,2010,46(3):6-9.

[3] 逯怀东,陈玉峰,朱文兵,等.一起500kV并联电抗器振动异常的分析处理[J].高压电器,2008,44(2):153-155.

[4] RSMIRSZ C, CALVA P A. Simulation of electric power CBs in the EMTP incorporating electric arc models application to reactor bank switching and short line fault [C]//Proceedings of the 2001 Annual Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.I.]:IEEE,2001:660-664.

[5] 王伟,韩金华,李德志,等.河南电网500 kV并联电抗器运行状况分析[J].高压电器, 2009, 45(4): 82-85.

[6] 吴钊, 赵庆斌.高压交流断路器开合并联电抗器试验研究[J]. 高压电器, 2012, 48(7): 45-51.

[7] 杜斌祥,张友鹏,田铭兴,等.特高压可控并联电抗器补偿度的研究[J].高压电器,2010, 46(11):5-8.

[8] PORTELA C M, MORAIS S A, TEIXERIA J S. CB behavior in reactor switching: Applicability and limitations of the concept of chopping number [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988,3(3): 1009-1021.

（下转第88页）