

800 kV断路器切并联电抗器试验分析

在超高压电网中,通常采用并联电抗器进行无功补偿限制工频电压升高。断路器开合并联电抗器时电流很小,主要考核其耐受过电压的能力。在分析800 kV断路器切除并联电抗器过程中截波过电压和重燃过电压产生原理的基础上,通过计算得出800 kV断路器切除并联电抗器时最高会产生约3倍的过电压。最后经过试验验证,某公司生产的800 kV断路器切除并联电抗器时的过电压在2.02~2.84倍之间,且在额定油压和额定气压下进行切除并联电抗器试验相对容易。

孙英杰 段晓辉 卢彦辉 王赛豪 张银穗/平高集团有限公司

0 引言

在电力系统中,切除电感过电压是一种常见的操作过电压,并联电抗器实际上就是一个比较大的电感。在超、特高压线路中广泛采用并联电抗器补偿线路的对地充电功率,削弱输电线路的电容效应,有效抑制工频与操作过电压。但当电网负荷较重时,并联电抗需全部或部分切除,以避免过分消耗系统感性功率,但如何安全、顺利切断并联电抗器是绝对不容忽视的问题。

并联电抗器在正常运行时吸收了一定的无功功率,并存储在电感内,当断路器将并联电抗器从系统中切除时,其存储的能量通过电感等值入口电容迅速释放,将磁场能转化为电场能。由于电感等值入口电容很小,因而会激发出较高的过电压。断路器开断并联电抗器时通常会出现截流过电压或重燃过电压,这种过电压可能对电网绝缘造成威胁,引起线路中设备(包括并联电抗器、避雷器、电容式压变及开关等)的绝缘损坏或引起单相重合闸失败^[1-5]。

目前国内各试验室没有800 kV断路器开合并联电抗器的试验设备,世界上只有荷兰KEMA试验室能进行该试验。根据IEC 62271—110(GB/T 29489)标准试验回路介绍了800 kV断路器切除并联电抗器的试验方法和过程,并分析了800 kV断路器切除并联电抗器型式试验过程中,截波过电压和重燃过电压产生机制和计算方法,最后将计算结果和试验结果进行了对比。

1 试验接线和试验参数

1.1 试验接线

开合并联电抗器接线图如图1所示。图1中, U_s 为电源电压; L_s 为电源侧的等值电感; L_{b1} 、 L_{b2} 为连接线电感; C_s 为电源侧等值电容; L 为并联电抗器; C_L 为电抗器侧等值电容; T_0 为切电抗器的断路器。

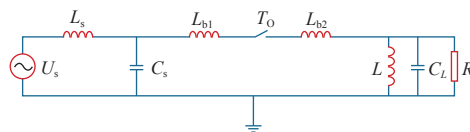


图1 开合并联电抗器试验接线图

1.2 试验状态

断路器只进行开断试验,未装合闸电阻。右侧接电源回路,左侧接负载回路。断路器与地面绝缘。样机试验状态图如图2所示。

1.3 试验参数

断路器采用IEC 62271—110(GB/T 29489)中规定的负载回路1、2分别进行并联电抗器开断试验,试验参数如表1所示。



孙英杰/工程师

关键词/Keywords

800 kV断路器 ·
并联电抗器 ·
截波过电压 ·
重燃过电压 ·



图2 样机试验状态图

表1 试验参数

试验项目	开断次数/次	操作油压操作 电压气室压力	负载回路的 试验电流/A	TRV峰值 /kV
方式1	20	额定	$(1 \pm 20\%)315$	1 241
方式2	20		$(1 \pm 20\%)100$	
方式3	18			
方式4	20	闭锁		

2 试验过程中开断过电压分析计算

2.1 开断过电压分析

当断路器将电网系统中运行的并联电抗器切除时,断路器开断电流很小(电流大约几十安培到三百多安培)。目前超高压SF₆断路器大多采用压气式灭弧方式,断路器灭弧能力强,切除电抗器感性小电流时,一般都会出现提前过零点截流现象。电流开断后,电抗器侧线路上的电感和电容中储存的能量相互转移而形成衰减振荡,振荡频率范围为1~5 kHz^[2]。断路器断口间承受的电压为电源侧电压与电抗器侧缓慢衰减的振荡电压之差。

电流截流引起的过电压取决于截断电流的大小,截断电流越大,断路器两端的过电压越高。截流大小又与燃弧时间有关,一般情况下截流随燃弧时间的增大而增大。这是因为燃弧时间越长,断路器触头的开距越大,相应的熄弧能力越强。相反,在最短燃弧时间截流很小,有时还不出现截流。所以在长燃弧时间范围进行断路器开断电抗器试验是比较苛刻的。但在截流较小情况下,截流的陡度却不一定小,此时断路器的开断试验也不容忽视^[6]。如图3所示,截流引起的暂态起始电压为对地工频电压峰值 u_0 与电弧电压 u_s 之

和,过电压的首个峰值与开断瞬间系统电压是同一极性,该电压即是抑制对地峰值过电压。

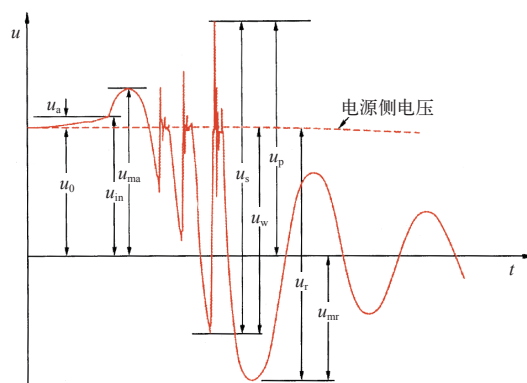


图3 单相试验时瞬态电压图

断路器开合并联电抗器试验有4种试验方式,试验方式1、2和4各有20次开断试验,且20次开断要在一个周波各个相位上均布,所以断路器可能会在最短燃弧时间要小于1 ms时进行开断试验。对于超高压断路器,在触头分闸1 ms距离时很难耐受如此高的恢复电压。在过零点熄弧瞬间,触头间隙还没有足够的绝缘强度,就会出现重燃。在熄弧和重燃过程中,工频电流偏离零值点。如果随着工频电流的增大,高频电流的作用较小,不能形成新的电流过零点,就不再熄弧。之后,在断口的弧道中维持工频电流,直至该相电流的下一个电流过零点最终分闸^[7]。由于燃弧时间短,恢复电压高,几乎所有的高压断路器在开合电抗器试验时都会发生重燃现象。

对于具有较高截流水平的超高压断路器,在抑制电压峰值出现瞬间或之前,还可能会出现重燃及多次重燃。重燃后,有些熄弧能力较强的开关,电弧会很快再次熄灭,而恢复电压也会再次出现。随触头间距不断拉大,介质强度也越来越高,导致每次重燃的击穿电压逐级上升^[7]。图3显示了出现截流和重燃时暂态电压的变化过程^[8]。

图3中, u_0 为地工频电压峰值; u_a 为断路器的电弧电压; $u_{in} = u_0 + u_a$ 截流时对地的起始电压; u_{ma} 为抑制对地峰值电压; u_{mr} 为负载侧对地电压峰值; u_p 为最大对地过电压(可能等于 u_{ma} 或 u_{mr}); u_s 为重燃时最大峰——峰电压幅值; u_w 为重燃时断路器两端电压; u_r 为恢复电压峰值处断路器两端的电压。

2.2 截流过电压计算

开合并联电抗器试验回路接线图参见图1。设 $U_s = E \cos \omega t$ ，断路器开断时间 $t = t_0$ ，对应的相角 $\alpha = \omega t_0$ ，断路器截流值为 I_{ch} ，此时， $U_s = E \cos \alpha$ ； $U_C = E \cos \alpha$ ； $I_{ch} = I \sin \alpha$ 。

当回路总磁场能全部转化为电场能时，电容 C_L 上的电压最大值为 U_m ，则

$$\frac{1}{2} C_L U_C^2 + \frac{1}{2} L I_{ch}^2 = \frac{1}{2} C_L U_m^2 \quad (1)$$

$$U_m = \sqrt{E^2 \cos^2 \alpha + I_{ch}^2 \frac{L}{C_L} \sin^2 \alpha} \quad (2)$$

于是截流后产生的过电压倍数为

$$k_a = \frac{U_m}{E} = \sqrt{\cos^2 \alpha + \left(\frac{I_{ch}}{E} \right) \frac{L}{C_L} \sin^2 \alpha} \quad (3)$$

又

$$I_{ch} = \frac{E}{\omega L} \quad (4)$$

则

$$k_a = \sqrt{\cos^2 \alpha + \frac{1}{\omega^2 L C_L} \sin^2 \alpha} \quad (5)$$

由于磁能转化为电能时有一定的损耗，它不能100%地转化为电能，需加以修正，引入转化系数 η ，于是式(5)可以修正为

$$k_a = \sqrt{\cos^2 \alpha + \frac{\eta}{\omega^2 L C_L} \sin^2 \alpha} \quad (6)$$

根据式(6)可知，当 L 和 C_L 是不变时，截流过电压仅取决于截流值，在本次试验中，最大截流值不超过38 A，开断时相角 α 不超过 7° ，过电压倍数最高为

$$k_{amax} = \sqrt{0.985 + 0.015 \frac{\eta}{\omega^2 L C_L}} \quad (7)$$

本次试验中 C_L 约为2 600 pF，最小 L 约为8.25 H，令 $\eta = 1$ （空心电抗器 $\eta \approx 1$ ）^[10]，代入式(7)中， $k_{amax} = 2.84$ 。

即该公司800 kV断路器发生截波时，产生的过电压可能为工频峰值电压的2.84倍。

发生截波时波形如图4所示。开断电流局部放大图如图5所示。

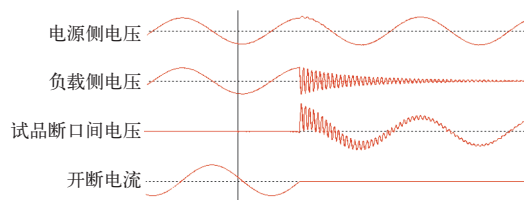


图4 发生截波时波形

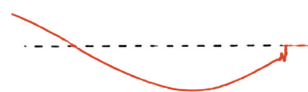


图5 开断电流局部放大图

2.3 重燃过电压计算

重燃时，负载侧电压迅速接近电源侧电压，并趋于超过，从而产生重燃过电压。伴随重燃出现的高频振荡称为“第2并联振荡”，由于高阻尼，其迅速衰减。考虑到阻尼，在恢复电压峰值时刻发生重燃时，就产生最大过电压^[11]。最大对地重燃过电压倍数 k_p 由式(8)给出^[2]

$$k_p = 1 + \beta(1 + k_a) \quad (8)$$

式中， β 为衰减系数，其值通常不超过0.5。

取 β 为0.5，则 $k_p = 1 + 0.5(1 + 2.84) = 2.925$ 。

即发生截波和重燃时，产生的过电压可能为工频峰值电压的2.925倍。

发生截波和重燃时试验波形如图6所示。发生重燃时试验波形局部放大图如图7所示。

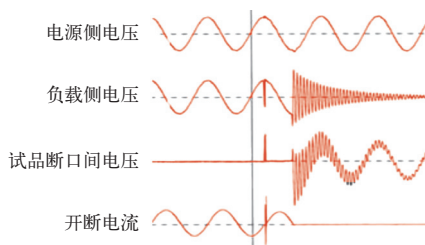


图6 发生截波和重燃时试验波形

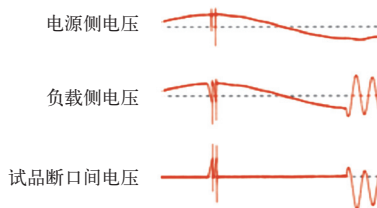


图7 发生重燃时试验波形局部放大图

3 型式试验结果

3.1 试验结果

某公司800 kV断路器切并联电抗器试验结果

如表2所示。
根据表2可知，在试验过程中断路器断口两端产生的过电压最大在2.02~2.84(pu)之间，最大值与分析计算结果2.925(pu)基本一致。

表2 某公司800 kV断路器试验结果

试验方式1		试验方式2		试验方式3		试验方式4	
序号	过电压(pu)	序号	过电压(pu)	序号	过电压(pu)	序号	过电压(pu)
1	2.10	1	2.35	1	2.44	1	2.26
2	2.37	2	2.13	2	2.69	2	2.20
3	2.30	3	2.37	3	2.16	3	2.17
4	2.20	4	2.31	4	2.58	4	2.15
5	2.30	5	2.31	5	2.19	5	2.09
6	2.14	6	2.17	6	2.38	6	2.02
7	2.18	7	2.19	7	2.09	7	2.84
8	2.12	8	2.16	8	2.31	8	2.61
9	2.09	9	2.09	9	2.04	9	2.36
10	2.07	10	2.06	10	2.20	10	2.41
11	2.38	11	2.02	11	2.07	11	2.33
12	2.34	12	2.72	12	2.05	12	2.21
13	2.36	13	2.76	13	2.58	13	2.14
14	2.26	14	2.43	14	2.56	14	2.13
15	2.13	15	2.39	15	2.05	15	2.12
16	2.16	16	2.23	16	2.24	16	2.08
17	2.14	17	2.20	17	2.74	17	2.54
18	2.16	18	2.24	18	2.64	18	2.33
19	2.11	19	2.11			19	2.35
20	2.09	20	2.09			20	2.46

3.2 试验结果分析

开合并联电抗器试验主要考核断路器耐受过电压能力。标准规定断路器在电流过零点可能由于重燃而不能开断，但只要在下一个电流过零点成功开断即可。此时，断路器动触头至少已脱离静触头10 ms。尽管断路器分闸速度快，压气缸气吹强，开断能力强，但截断感性小电流的大小基本不变，不会显著增大截流过电压。于是分闸速度越快，分闸10 ms后动触头距离静触头越远，断口间绝缘强度越高，对试验越有利。

采用试验回路2的3种试验方式中试验方式3的平均过电压最高，其采用额定油压和额定气压，18次开断试验的平均过电压2.42(pu)；试验方式4采用闭锁油压和闭锁气压，20次开断的平均过电

压2.29(pu)。试验方式3比试验方式4的过电压高了5.7%，相差不大。但额定气压比闭锁气压的绝缘强度高了20%。所以断路器在额定油压和额定气压条件进行开合电抗器试验相对容易。

4 结束语

断路器开断并联电抗器时，开断电流很小，易产生截流。截流产生的过电压主要取决于截断电流值大小，截流越大，其产生的过电压越大。

高压断路器在切除并联电抗器时，由于燃弧时间短，恢复电压高，几乎都会发生重燃，并产生重燃过电压。

通过试验室试验验证，按照标准规定条件，
(下转第50页)

- [2] 沙非, 马成廉, 刘闯, 等. 变速恒频风力发电系统及其控制技术研究 [J]. 电网与清洁能源, 2009, 25 (1): 44-47.
- [3] 夏长亮, 宋战锋. 变速恒频风力发电系统变桨距自抗扰控制 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (14): 91-95.
- [4] Del Valle Y, Venayagamoorthy G K, Mohagheghi S, et al. Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12 (2): 171-195.
- [5] Vlachogiannis J G, Lee K Y. A comparative study on particle swarm optimization for optimal steady-state performance of power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (4): 1718-1728.
- [6] Seyit A A, Dinler A. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications [J]. Energy Conversion and Management, 2009 (50): 1761-1766.
- [7] 丁明, 吴义纯, 张立军. 风电场风速概率分布参数计算方法的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 25 (1): 107-110.
- [8] 包广清, 毛开富. 改进粒子群算法及其在风电系统中的应用 [J]. 控制工程, 2013, 20 (2): 262-266.
- [9] 马祎炜, 俞俊杰, 吴国祥, 等. 双馈风力发电系统最大功率点跟踪控制 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (4): 202-208.
- [10] Kuo R J, Hong S Y, Huang Y C. Integration of particle swarm optimization-based fuzzy neural network and artificial neural network for supplier selection [J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34 (12): 3976-3990.
- [11] Arya L D, Titare L S, Kothari D P. Improved particle swarm optimization applied to reactive power reserve maximization [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2010, 32 (5): 368-374.
- [12] 蒋秀洁, 徐满清, 龚学会, 等. 计及阀点效应负荷经济分配的杂交粒子群算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (8): 10-13.

(收稿日期: 2015-06-01) **EA**

(上接第45页)

某公司800 kV断路器开断并联电抗器时的过电压在2.02~2.84(pu)之间, 与分析计算结果基本一致。

某公司800 kV断路器在额定油压和额定气压下进行切除并联电抗器试验相对容易。

参考文献

- [1] 邓雨荣. 500 kV并联电抗器开断的过电压及限制措施 [J]. 广西电力, 2000 (1): 15-17.
- [2] 黄安利. 美IEEE并联电抗器操作的新应用导则 [J]. 华东电力, 1998 (1): 49-51.
- [3] 冯宝忆. 用并联电抗器补偿的500 kV输电线路的断相过电压 [J]. 华东电力, 1986 (6).
- [4] 杜宁, 关永刚, 张景升, 等. 40.5 kV真空断路器开断并联电抗器的现场试验 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50 (4): 517-520.
- [5] 李召家, 黎东升. 真空断路器投切并联电抗器试验研究 [J]. 广东电力, 2003, 16 (4): 29-33.
- [6] 杨大卫. SF₆断路器切并联电抗器组试验研究 [J]. 高压技术, 1992 (2).
- [7] 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 (7).
- [8] 刘伯涛. KW5-500型空气断路器开断电抗器的试验研究 [J]. 高压电器, 1986 (1).
- [9] 解广润. 电力系统过电压 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [10] 孙秋芹, 李庆民, 王冠, 等. SF₆断路器开断并联电抗器的截流过电压及其特性分析 [J]. 电工技术学报, 2010 (2).
- [11] IEC 62271-110. High-voltage switchgear and control gear-part 110: inductive load switching [S].

(收稿日期: 2015-11-13) **EA**