

10 kV 并补装置中电感元件过电压保护

王宏斌¹, 鲁旭臣¹, 施 围¹, 安宗贵²

(1. 西安交通大学, 陕西 西安 710049; 2. 陕西咸阳供电局, 陕西 咸阳 712000)

Overvoltage Protection of Inductors in 10 kV Parallel Reactive Power Compensating Devices

WANG Hong-bin¹, LU Xu-chen¹, SHI Wei¹, AN Zong-gui²

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Shangxi Xianyang Power Supply Bureau, Xianyang 712000, China)

摘要: 电力系统投切并联无功补偿装置时, 容易产生过电压, 造成电感元件的损坏, 严重影响并补装置的安全运行。通过对 10 kV 并补装置中电感元件的合闸与重燃过电压进行模拟计算, 研究了采用并联电阻与间隙配合对电感元件进行过电压保护的效果。

关键词: 无功补偿; 电感; 过电压; 并联电阻;

电磁暂态计算程序

中图分类号: TM86

文献标识码: A

Abstract: In power system, when parallel reactive power compensating devices are switched, overvoltage often occurs, which causes damage to inductors and operating problems to shunt capacitors. In this paper, the overvoltage occurred when shunt capacitors are removed or switched in a 10 kV power system are calculated, and the effectiveness of using shunt resistor and gap to mitigate overvoltage is studied.

Key words: reactive power compensation; inductor;

overvoltage; shunting resistor; EMTP

0 引言

随着电力工业的发展, 系统对无功的需求也越来越大, 于是系统中大量采用了并联补偿装置。为了减少涌流的危害, 常在电容器组上串联电感。在电容器串联电感后, 增大了电路的感抗, 电容的放电电流将减小, 电感选择适当, 便可将涌流限制在允许的范围内。同时加装串联电抗也可以限制高次谐波的影响^[1]。

目前电力系统中使用的并联无功补偿装置的保护方案有很多, 如电感并联 R-C 过电压吸收器、避雷器或组合避雷器、电感并联 ZnO 阀片等^[2]。但在实际应用中, 电抗器起火、变色, 电容器内部单元损坏、爆炸等事故屡屡发生^[3]。有人提出用并联电阻和间隙来保护电感元件的方案, 但该方案在实际应用中

还不普遍, 相关论文也比较少。笔者主要计算和分析并联电阻和间隙保护电感元件的方案。

1 建立系统

一个完整的电力系统包含多条线路、多种电力设备, 网络结构复杂, 元件数目众多。但是暂态过程只是在一个范围内发生的, 所以计算时不需要对整个电网进行模拟。笔者建立了一个简单的 110 kV/10 kV 降压变电站系统模型见图 1。

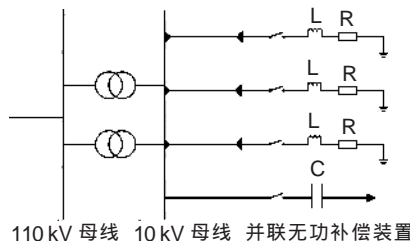


图 1 系统单相等值电路图

它是由两台降压变压器供电的放射式配电网, 有三回出线。每回出线输送距离为 10 km, 传输功率 1 MW, 负荷阻抗 $Z=(49.421+j44.920)$, 系统补偿无功容量为 2.042 Mvar^[4]。并联电容器的接线方式为不接地的单星型连接。系统稳态时的电压以及功率因数见表 1, 其中: $1 \text{ p.u.}=U_N \times \sqrt{2}/3$ 。

表 1 稳态计算结果($U_N=11.5 \text{ kV}$)

项目	母线电压 /p.u.	负荷电压 /p.u.	母线处功率因数
无无功补偿装置	1.005	0.946	0.712
有无功补偿装置	1.021	0.957	0.958

由此可见, 所建立的系统可以稳定运行, 以后的计算就是以这个系统为基础, 使用 EMTP 电磁暂态分析程序进行。

收稿日期: 2005-12-26; 修回日期: 2006-02-31

作者简介: 王宏斌(1982-), 男, 山东淄博人, 在读硕士研究生, 研究方向为电力系统的计算机仿真及过电压保护。

2 投切并补装置时电感元件的过电压

投切并补装置时在电感元件上产生的过电压有两种: ①合闸时产生的过电压; ②切除时, 由开关发生重燃产生的过电压。对以上两种情况均进行了计算, 并考虑了并补装置参数对其过电压值的影响。

2.1 合闸过电压的计算与分析

电感两端的过电压值与并补装置的串联电抗率和无功补偿容量有关。不同串联电抗率和无功补偿容量下计算得到的电感合闸过电压见表 2 和表 3。

表 2 串联电抗率对合闸过电压的影响

X_L/X_C	U_L/kV	U_L	X_L/X_C	U_L/kV	U_L
1%	7.8	82.5	8%	12.9	15.8
2%	8.3	43.7	9%	13.3	14.3
3%	9.8	33.8	10%	13.7	13.2
4%	10.6	27.2	11%	14.0	12.1
5%	11.0	22.3	12%	14.4	11.3
6%	11.6	19.4	13%	15.0	10.7
7%	12.3	17.4	14%	15.4	10.1

表 3 系统无功补偿容量对合闸过电压的影响($X_L=2.94$)

$Q_c/Mvar$	U_L/kV	U_L	$Q_c/Mvar$	U_L/kV	U_L
1.6	11.1	29.4	2.6	11.8	18.7
1.8	11.2	26.2	2.8	12.1	17.7
2.0	11.3	23.6	3.0	12.3	16.7
2.2	11.3	21.4	3.2	12.5	15.8
2.4	11.5	19.8	3.4	12.7	15.0

X_L/X_C ——串联电抗率 U_L ——电感两端过电压 U_L ——电感两端的暂态过电压与其稳态电压之比 Q_c ——系统无功补偿容量(以下同)

并联无功补偿装置合闸时电感的过电压普遍高达其稳态电压的 10 倍以上, 对于串联电抗率较小的并补装置, 其电感过电压甚至超过了其稳态电压的 50 倍。随着串联电抗率变大, 电感的过电压倍数 U_L 会逐渐变小, 在串联电抗率较小时, 这一趋势非常明显, 在串联电抗率超过约 8% 以后, 过电压随串联电抗率的变化趋于平缓。同时电感过电压 U_L 随着无功补偿容量的增大而略有增大。

2.2 重燃过电压的计算与分析

切除并补装置时发生的重燃有很大的随机性, 还有可能发生多次重燃。实际应用中, 出现概率比较大的是一次单相和两相重燃。

使用的无功补偿装置的中性点是不接地的, 当某一相发生重燃时, 其它两相仍旧是断开的, 不形成回路, 电感在重燃前后都没有电流, 也就没有明显的电压产生。因此, 一次单相重燃与不发生重燃时简单的切除过电压是相同的, 且其过电压值相对较低。

不同串联电抗率和无功补偿容量下计算得到一次两相重燃时电感两端的过电压见表 4 和表 5。

并联无功补偿装置一次两相重燃时电感的过电压是非常大的, 在串联电抗率较小时可以达到稳

表 4 串联电抗率对一次两相重燃过电压的影响

X_L/X_C	U_L/kV	U_L	U_c/kV	U_c	X_L/X_C	U_L/kV	U_L	U_c/kV	U_c
1%	30.3	319.9	28.1	2.97	8%	56.5	69.3	29.6	2.91
2%	40.6	212.6	28.5	2.98	9%	54.9	59.2	29.7	2.89
3%	47.4	163.8	28.8	2.98	10%	60.2	57.8	29.9	2.87
4%	43.4	111.1	29.0	2.97	11%	58.4	50.4	30.0	2.85
5%	50.6	102.7	29.2	2.96	12%	55.3	43.3	30.1	2.83
6%	54.8	91.7	29.4	2.95	13%	58.4	41.7	30.3	2.81
7%	50.9	72.1	29.5	2.93	14%	63.7	41.7	30.4	2.78

表 5 系统无功补偿容量对重燃过电压的影响

$Q_c/Mvar$	U_L/kV	U_L	$Q_c/Mvar$	U_L/kV	U_L
1.6	30.5	80.6	2.6	48.2	76.3
1.8	48.3	113.2	2.8	48.5	70.9
2.0	45.6	95.4	3.0	50.6	68.6
2.2	51.8	98.1	3.2	49.2	62.2
2.4	50.2	86.6	3.4	53.6	63.3

U_c ——电容极间过电压 U_c ——电容极间过电压与其稳态电压之比
态电压的上百倍, 串联电抗率较大时也有几十倍。其变化趋势与合闸过电压相似, 但过电压值却是合闸时的数倍, 对电感元件的危害非常大, 因此在考虑保护方案时将两相重燃过电压作为主要参考。

实际应用中, 出现概率比较大的是一次重燃, 但二次重燃也时有发生, 而更高次的重燃情况由于实际应用中很少出现。文中计算考虑了第二次单相重燃和第二次两相重燃的情况, 计算得到的 4%、6% 和 10% 串联电抗率下的二次重燃过电压见表 6。

表 6 电感两端二次重燃过电压

类型	4%电抗	6%电抗	10%电抗
第二次为单相重燃 /kV	43.4	54.7	60.2
第二次为两相重燃 /kV	57.2	55.2	69.9

对比一次两相重燃的数据, 二次重燃的过电压比一次两相重燃的稍大, 但差距并不大。

3 并联电阻保护电感元件方案的研究

由以上的计算可以看出, 投切并联无功补偿装置时在电感上发生的过电压如不加以保护, 将造成电感元件的损害并威胁并联无功补偿装置的安全运行。

3.1 保护方案的原理

图 2 为并联电阻保护电感元件方案的结构示意图。当电感两端产生过电压时, 间隙将被击穿, 电阻投入, 起到阻尼作用; 当过电压由峰值降下来后, 间隙恢复, 电阻撤出, 以此来限制电感上的过电压。

如果电阻的阻值很大, 如 1 000 Ω 以上, 流过其中的电流很小, 它对回路的影响很小, 对电感而言, 等于没有加阻尼装置, 不能限制电感上的过电压; 如果电阻的阻值很小, 如 0.1 Ω 以下, 则 R 将串联电感 L 短接了, 将不能有效地限制涌流。所以, 在一定的回路条件下, 应该有一个最佳的电阻值, 在此阻值下

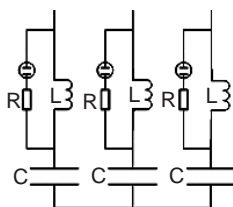


图 2 并联电阻保护电感元件方案的结构示意图

可以将电感过电压降到合适的值，并能保证涌流在设备允许范围内。

根据并联电容器的额定电压，选用适当的真空间隙以保证足够的绝缘水平、爬电距离和灭弧能力，仔细调整真空间隙的距离，确保它能在断路器重燃时动作，而在合闸相位接近电源电压峰值时的合闸操作中也能动作，这样该装置不但可以抑制断路器重燃时的过电压，还可以降低合闸时的一部分较高的过电压。在正常运行时，真空间隙是不会误动作的，选择合适的真空间隙，其动作寿命可达 1 万次以上，甚至 10 万次，真空间隙的击穿电压不受外界影响，动作可靠，寿命长，因此提高了整个装置的可靠性。

3.2 保护的效应

由上文计算可以看到，一次两相重燃过电压对并补装置中电感元件的危害是非常大的，可将它作为考查保护效果的主要参考。而不同串联电抗率下过电压的电压值差异很大，需要根据串联电抗率的不同来分析并联电阻保护方案的保护效果。

电阻的取值对于限制过电压和限制涌流两方面来说是矛盾的。从限制过电压的角度，计算了将一次两相重燃时的过电压限制在稳态电压的 5 倍，10 倍，15 倍和不加保护装置两相重燃过电压的 10% 时的情况，见表 7~表 10。

对比表 4 和以上计算所得到的相关数据，可以

表 7 将两相重燃过电压限制于 5 倍稳态电压

X_L/X_C	R/	$I_{d_{\text{max}}}$	U_c/kV	U_c	X_L/X_C	R/	$I_{d_{\text{max}}}$	U_c/kV	U_c
1%	0.11	10.4	26.8	2.83	8%	1.11	8.2	21.3	2.09
2%	0.23	10.0	26.0	2.72	9%	1.31	7.9	20.4	1.98
3%	0.34	9.7	25.3	2.62	10%	1.52	7.5	19.6	1.88
4%	0.46	9.4	24.6	2.52	11%	1.75	7.1	18.7	1.78
5%	0.62	9.1	23.8	2.41	12%	2.00	6.9	17.9	1.68
6%	0.77	8.7	22.9	2.30	13%	2.29	6.5	16.9	1.57
7%	0.94	8.5	22.2	2.20	14%	2.60	6.2	16.0	1.47

表 8 将两相重燃过电压限制于 10 倍稳态电压

X_L/X_C	R/	$I_{d_{\text{max}}}$	U_c/kV	U_c	X_L/X_C	R/	$I_{d_{\text{max}}}$	U_c/kV	U_c
1%	0.23	10.0	26.1	2.76	8%	3.00	6.3	15.6	1.53
2%	0.48	9.6	24.6	2.58	9%	3.70	5.8	14.3	1.39
3%	0.76	9.1	23.2	2.40	10%	4.50	5.2	13.2	1.27
4%	1.10	8.6	21.6	2.21	11%	5.47	4.7	12.5	1.19
5%	1.46	8.0	20.1	2.04	12%	6.65	4.2	12.4	1.16
6%	1.86	7.6	18.6	1.87	13%	8.16	3.7	12.8	1.19
7%	2.38	6.9	17.1	1.70	14%	10.2	3.2	13.5	1.24

表 9 将两相重燃过电压限制于 15 倍稳态电压

X_L/X_C	R/	$I_{d_{\text{max}}}$	U_c/kV	U_c	X_L/X_C	R/	$I_{d_{\text{max}}}$	U_c/kV	U_c
1%	0.36	9.9	25.4	2.68	8%	6.38	4.5	13.3	1.31
2%	0.77	9.2	23.2	2.43	9%	8.58	3.8	14.0	1.36
3%	1.27	8.5	21.1	2.19	10%	12.8	2.9	15.5	1.49
4%	1.87	7.7	19.0	1.95	11%	23.0	2.6	18.6	1.77
5%	2.65	6.9	16.9	1.71	12%	54.0	2.1	23.2	2.18
6%	3.62	6.1	15.0	1.51	13%	\	\	\	\
7%	4.80	5.3	13.7	1.36	14%	\	\	\	\

表 10 将两相重燃过电压限制于为保护时的 10%

X_L/X_C	R/	$I_{d_{\text{max}}}$	U_c/kV	U_c	X_L/X_C	R/	$I_{d_{\text{max}}}$	U_c/kV	U_c
1%	0.89	9.2	23.2	2.45	8%	1.71	7.5	18.9	1.86
2%	1.21	8.7	21.6	2.26	9%	1.64	7.5	19.1	1.86
3%	1.43	8.3	20.6	2.13	10%	1.86	7.2	18.3	1.76
4%	1.24	8.3	21.1	2.16	11%	1.77	7.2	18.6	1.77
5%	1.50	8.0	19.9	2.02	12%	1.64	7.2	19.1	1.79
6%	1.65	7.8	19.3	1.94	13%	1.77	7.0	18.6	1.73
7%	1.49	7.8	19.8	1.97	14%	2.00	6.7	17.8	1.63

R——满足条件的电阻值 $I_{d_{\text{max}}}$ ——合闸涌流的倍数(即合闸涌流与正常运行时流过电容和电感的电流之比)

看到采用并联电阻保护方案后，电感两端的过电压有了明显的下降，同时，并联电阻保护方案对电容器的极间过电压也能很好地加以限制。从以上数据还可以看到，随着串联电抗率的增加，适用的电阻值也在不断增加，涌流被限制得越来越小。同时，当串联电抗率很小时，放宽对电感过电压的限制条件，并不能明显降低涌流并限制电容极间过电压，即在此时可能找不到合适的电阻值使过电压和涌流都限制在装置允许范围内。而对于串联电抗率较大时的情况，上述 4 种方案几乎都可以将涌流限制在较小的值。

无功补偿容量的变化也会对并联电阻保护方案的保护效果存在影响。采用并联电阻保护方案，改变系统无功补偿容量，并将两相重燃过电压限制在稳态电压的 5 倍，计算得到相关数据见表 11。

表 11 无功补偿容量对保护效果的影响($X_L=2.94$)

$Q_c/Mvar$	R/	$I_{d_{\text{max}}}$	$Q_c/Mvar$	R/	$I_{d_{\text{max}}}$
1.6	0.58	11.5	2.6	0.80	8.4
1.8	0.63	10.8	2.8	0.85	8.0
2.0	0.67	10.0	3.0	0.90	7.6
2.2	0.71	9.5	3.2	0.94	7.2
2.4	0.76	8.9	3.4	0.99	6.9

由上表看到：随着系统补偿容量的增大，适用的电阻值也变大，合闸涌流变小。

通过以上的模拟计算可得到以下结论：

(1) 采用并联的电阻和间隙在大多数情况下能有效保护并补装置中的串联电感，可以同时二次重燃过电压和合闸涌流限制在装置能承受的范围。

(2) 随着串联电抗率的增大，该方案保护效果越来越明显。同时无功补偿容量较大时，也能改善保护

效果。

(3) 对于最佳的电阻值的选择, 需要根据串联电抗率进行讨论, 一般而言, 在串联电抗率很小时, 找不到可以同时限制过电压和涌流的电阻值; 若串联电抗率为 4%~7%, 可以采用将两相重燃过电压限制在稳态电压的 5 倍时的电阻值; 当串联电抗率为 8%~11%, 可以采用将两相重燃过电压限制在稳态电压的 10 倍时的电阻值; 若串联电抗率为 12%~14%, 可以采用将两相重燃过电压限制在在稳态电压的 15 倍时的电阻值。实际应用中, 还要根据无功补偿容量的大小及其他情况, 再作具体分析。

在实际应用中, 某变电站的集合式并联电容器使用了并联电阻和间隙来保护电感元件的方案, 实践证明它能有效限制各类过电压和合闸涌流, 避免由电抗器损坏引起的损失, 保证设备安全运行。

4 结语

利用一典型的 10 kV 带并联无功补偿装置的低压系统, 研究了投切并联无功补偿装置时, 电感元件上的合闸过电压和重燃过电压。从计算结果中可知, 合闸时电感过电压可以达到稳态电压的十到几十倍, 一次两相重燃过电压可达到稳态电压的三

十到几百倍, 它们的过电压倍数 U_L 分别随串联电抗率及无功补偿容量的增大而减少。

还研究了并联电阻与间隙对电感元件进行过电压保护的效果, 计算结果表明该方法在大多数情况下能有效地保护并补装置中的串联电感。保护效果随串联电抗率和无功补偿容量的增大而愈明显, 因此最佳电阻值的选择需要根据串联电抗率进行讨论, 一般而言, 在很小的电抗率时找不到合适的电阻; 在电抗率较大时可以选择将过电压限制在 5 倍的稳态电压及以下; 其它的情况下, 可以根据需要选择将过电压限制在 15 倍、10 倍稳态电压等。同时需要考虑无功补偿容量的影响。

参考文献:

- [1] 姜齐荣, 谢小荣, 陈建业. 电力系统并联补偿: 结构、原理、控制与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] 杜 斌. 35 kV 并联无功补偿兼滤波装置的重燃过电压及 MOA 保护方案的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2004.
- [3] 陶相普. 10 kV 集合式并联电容器运行可靠性分析[J]. 广西电力技术, 1999(4): 49-52.
- [4] 陈 珩. 电力系统稳态分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.

(上接第 273 页)

同电容量数值出现次数直方图曲线见图 7(b)。

通过计算, 求出 A 相电容量仿真数据的数学期望 $\mu=834.82$ pF, 标准差 $\sigma_1=5.66$; 采用环境温度有干扰而设备无故障的情况下的数据作为历史数据, 得出 $\mu_2=8.34$ pF, 标准差 $\sigma_2=0$; 二次报警值区间为 [809.5, 860.13] pF。从故障仿真试验中模拟电容被击穿的时刻(2004 年 7 月 10 日 07:00:00)开始, 二次报警区间以外的连续数据有 6 个, 见表 4, 大于事先设定的参数 $N=3$, 二次综合比较法认为这是一次故障。说明二次综合比较法在环境温度有干扰而设备有故障情况下, 能正确的诊断出仿真故障电路的故障。

表 4 报警值区间以外的数据

时刻	电容量 /pF
2004-07-10 07:00:00	863.88
2004-07-10 08:00:00	863.88
2004-07-10 09:00:00	863.88
2004-07-10 10:00:00	863.88
2004-07-10 11:00:00	863.88
2004-07-10 12:00:00	863.88

3 结语

(1) 二次综合比较法采用数理统计的原理对被

监测设备的历史数据做出分析得出报警区间, 增加了判据的可信度。采取了对参数 N 的比较和对报警值的二次确认的方法, 在考虑对测量值影响时, 要充分考虑影响测量值的几个主要方面, 才能有效减小环境因素的干扰。

(2) 在模拟故障时, 对环境温度无干扰设备有故障、环境温度有干扰设备无故障和环境温度有干扰设备有故障 3 种情况进行了讨论, 充分的模拟了现场的各种情况, 诊断分析表明, 二次综合比较法对各种情况都能做出正确的诊断。

参考文献:

- [1] 张喜林, 宋家骅. 电容型设备绝缘在线监测参数的修正计算[J]. 东北电力学院学报, 1994, 14(2): 1-6.
- [2] 单 平, 徐大可. 高精度微电流传感器补偿法研究 [J]. 高电压技术, 2002, 28(5): 21-24.
- [3] 盛 骤, 谢式干, 潘承毅. 概率论与数理统计 [M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2001.
- [4] 谈克雄. 电容型设备介质损耗在线监测技术 [J]. 今日电气, 2004, 1(1): 11-12.
- [5] 袁 斌. 绝缘在线监测系统误差环节浅析 [J]. 高电压技术, 1997, 23(1): 43-45.
- [6] 陈鹏云, 贺景亮, 赵生和, 等. 绝缘介质损耗因数在线监测的研究[J]. 高电压技术, 1994, 20(4): 36-38.