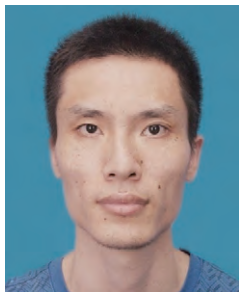


# 并联电容器组串联电抗器故障分析及解决方案研究

目前,谐波电流过大是造成电容器组串联电抗器发生烧毁的主要原因。以某110 kV变电站10 kV电容器组串联电抗器发生烧毁作为研究对象,首先分析了并联电容器组谐波放大的基本原理,然后以该变电站的实际设备参数进行仿真,得出该变电站10 kV电抗器烧毁的主要原因,最后提出相应的解决方案,并通过仿真计算验证方案的可行性,并最终得出结论:选取合适的串联电抗器参数既能有效抑制系统谐波,又能防止电抗器烧毁。

陈永稳/中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

陈翠琼/华南理工大学电力学院



陈永稳/工程师

## 关键词/Keywords

谐波 ·  
电容器组 ·  
串联电抗器 ·

并联电容器组作为电网的主要无功补偿设备,在电网中的应用非常广泛,但随着电网规模日益扩大和用电负荷不断增长,电网中的非线性负荷日益增多,造成注入电网的谐波电流不断增加,谐波成分也日益复杂。为了抑制谐波电流和限制电容器合闸涌流,电容器组中常设置串联电抗器<sup>[1-3]</sup>。国内许多文献以及实际运行经验均指出电容器组中串联电抗器的电抗率选择不当会导致谐波电流过大,严重情况下会烧毁电抗器。文献[4]从多种角度分析了并联电容器组串联电抗器在运行中常出现的问题并提出解决方法,其中重点指出若电容器组与串联电抗器参数匹配不当,会使系统阻抗与电容器组发生并联谐振,引起谐波电流过大,从而导致电抗器烧毁;文献[5]从电抗率的选取方法方面给出了比较详细的论述,具有较好的参考价值。本文将结合相关文献的研究成果,以某110 kV变电站10 kV电抗器烧毁作为研究对象,通过PSCAD仿真得出该变电站电容器组串联电抗器烧毁的原

因,提出解决方案并验证方案的可行性。

## 并联电容器谐波放大原理

供电系统谐波源主要是电流源,电流源的内阻抗很大,在外阻抗发生变化时,其电流基本不变。谐波源的负荷是整个供电系统,它包括主系统和所有用户的电力设备。图1为补偿电容器组接入电网时的接线图和谐波等效电路。

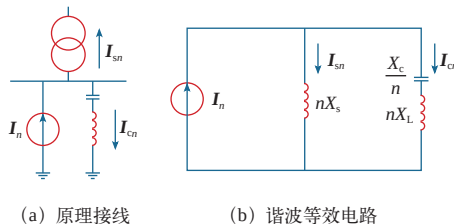


图1 电力系统谐波等效图

$I_n$ 为系统非线性负荷形成的谐波电流源, $X_s$ 、 $X_c$ 和 $X_L$ 分别为系统基波感抗、电容基波容抗和串联电抗器基波感抗。

当电流型谐波源含有 $n$ 次谐波分量,注入电容器支路的谐波电流与谐波电流源的关系为

$$I_{cn} = \frac{nX_s}{nX_s + nX_L - X_c/n} I_n = \frac{X_s}{X_s + X_L - X_c/n^2} I_n \quad (1)$$

注入系统的谐波电流与谐波电流源的关系为

$$I_{sn} = \frac{X_L - X_c/n^2}{X_s + X_L - X_c/n^2} I_n \quad (2)$$

谐波母线上产生的电压为

$$U_n = \frac{nX_s(X_L - X_c/n^2)}{X_s + X_L - X_c/n^2} I_n \quad (3)$$

1) 当 $X_L - X_c/n^2 = 0$ 时,  $h_{r1} = n = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}}$ ,  $I_{cn} = I_n$ , 电容器与串联电抗器发生串联谐振。同时可见, 串联电抗器电抗越大, 引起谐振的谐波次数越低, 即电抗率越大, 串联电抗器可以抑制更低次数的谐振谐波。

2) 当 $X_s + X_L - X_c/n^2 = 0$ 时,  $h_{r2} = n = \sqrt{\frac{X_c}{X_L + X_s}}$ , 电容器、系统和串联电抗器发生并联谐振, 谐波电流放大达到最大值。

3) 当 $2X_s + X_L - X_c/n^2 = 0$ 时,  $h_{k1} = n = \sqrt{\frac{X_c}{X_L + 2X_s}}$ ,  $|I_{sn}/I_n| = 2$ ,  $|I_{cn}/I_n| = 1$ , 该点对应的是电容器组谐波电流 $I_{cn}$ 的起始放大点。

4) 当 $0.5X_s + X_L - X_c/n^2 = 0$ 时,  $h_{k2} = n = \sqrt{\frac{X_c}{X_L + 0.5X_s}}$ ,  $|I_{sn}/I_n| = 1$ ,  $|I_{cn}/I_n| = 2$ , 该点对应的是系统谐波电流 $I_{sn}$ 的起始放大点。

综上所述, 可以绘出如图2所示的系统和并联电容器对谐波响应的频带分布图。 $h_{k1} \leq n \leq h_{k2}$ 为谐波电流严重放大区域,  $h_{k1}$ 和 $h_{k2}$ 为放大区域的界限, 串联电抗值 $X_L$ 越大,  $h_{k1}$ 和 $h_{k2}$ 越接近, 严重放大区缩小。电容器组回路的谐波放大率和系统谐波放大率分别为

$$F_{cn} = I_{cn} / I_n = \left| \frac{nX_s}{nX_s + nX_L - X_c/n} \right| = \left| \frac{n^2s}{n^2(s+K)-1} \right| \quad (4)$$

$$F_{sn} = I_{sn} / I_n = \left| \frac{nX_L - X_c/n}{nX_s + nX_L - X_c/n} \right| = \left| \frac{n^2K-1}{n^2(s+K)-1} \right| \quad (5)$$

其中

$$K = \frac{X_L}{X_c}, \quad s = \frac{X_s}{X_c} = \frac{Q_{cn}}{S_k} \quad (6)$$

可见谐波放大的情况与该接入点的短路容量 $S_k$ 、补偿电容器组的容量 $Q_{cn}$ 、电抗率 $K$ 以及系统谐波次数 $n$ 有关<sup>[6-7]</sup>。

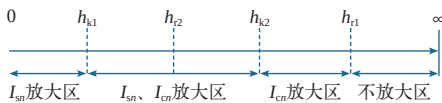


图2 系统和并联电容器对谐波响应特性的频带分布图

系统仿真

某110 kV变电站10 kV电容器组串联电抗器多次在运行过程中发生烧毁, 下面将以该110 kV变电站实际运行参数进行仿真分析, 找出故障原因, 以便提出相应的解决方案<sup>[9-10]</sup>。该变电站实际运行参数如下: 系统等效电感 $L_s = 0.001\ 293\ \text{H}$ , 电容器等效电容值 $C = 191.079\ \mu\text{F}$ , 串联电抗器等效电感值 $L = 0.003\ 2\ \text{H}$  (串联6%电抗器)。

图3为仿真模型图。BRK<sub>1</sub>和BRK<sub>2</sub>为断路器, 负责电容器组的投切, 当投入两组电容器时, BRK<sub>1</sub>和BRK<sub>2</sub>同时闭合。仿真时设置断路器的投入时刻 $t = 4\ \text{s}$ , 总的仿真时间为10 s。

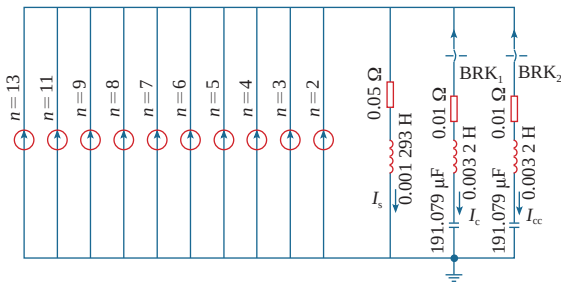


图3 PSCAD仿真模型图

从现场测得流入母线的各次谐波电流如表1所示, 将其作为谐波源接入到仿真电路中。其中基频 $f = 50\ \text{Hz}$ ,  $n$ 次谐波频率 $f_n = 50n\ \text{Hz}$ 。

表1 流入母线各次电流源谐波含量

| 谐波次数 | 幅值/A | 谐波次数 | 幅值/A |
|------|------|------|------|
| 2    | 8    | 7    | 28   |
| 3    | 26   | 8    | 1.5  |
| 4    | 3    | 9    | 4    |
| 5    | 40   | 11   | 3    |
| 6    | 2    | 13   | 3    |

仿真时BRK<sub>1</sub>、BRK<sub>2</sub>在 $t = 4\ \text{s}$ 时刻同时闭合, 系统支路总电流为 $I_s$ , 其中一条电容器支路总电流为 $I_c$ , 另一条电容支路总电流为 $I_{cc}$ , 表2、表3和表4为仿真结果。从表2、表3和表4可以看出, 投入两组电容器后, 流入系统的3次谐波变为原来的16.814 2倍, 流入电容器支路的3次谐波电流为210.342 A, 可见流过的3次谐波电流很大。下面对

发生该现象的原因进行详细分析。

表2 投入两组电容器后流入系统各次谐波电流含量

| 谐波次数 $n$ | 投入前电流稳定值 $I_{cn}/A$ | 投入后电流稳定值 $I_{cn}'/A$ |
|----------|---------------------|----------------------|
| 2        | 8                   | 10.766               |
| 3        | 26                  | 437.168              |
| 4        | 3                   | 0.136                |
| 5        | 40                  | 11.786               |
| 6        | 2                   | 0.801                |
| 7        | 28                  | 12.603               |
| 8        | 1.5                 | 0.717                |
| 9        | 4                   | 1.981                |
| 11       | 3                   | 1.544                |
| 13       | 4                   | 1.488                |

表3 投入两组电容器后电容器支路各次谐波含量

| 谐波次数 $n$ | 投入后电流稳定值 $I_{cn}/A$ | 谐波次数 $n$ | 投入后电流稳定值 $I_{cn}/A$ |
|----------|---------------------|----------|---------------------|
| 2        | 1.387               | 7        | 7.688               |
| 3        | 210.342             | 8        | 0.391               |
| 4        | 1.566               | 9        | 1.005               |
| 5        | 14.099              | 11       | 0.721               |
| 6        | 0.599               | 13       | 0.738               |

表4 电容器投入前后系统支路电流比

| 谐波次数 $n$ | 投入前后电流比 $K_n$ | 谐波次数 $n$ | 投入前后电流比 $K_n$ |
|----------|---------------|----------|---------------|
| 2        | 1.345 8       | 7        | 0.450 1       |
| 3        | 16.814 2      | 8        | 0.478         |
| 4        | 0.045 3       | 9        | 0.495 3       |
| 5        | 0.294 6       | 11       | 0.514 7       |
| 6        | 0.400 5       | 13       | 0.372         |

当主变压器上的两组电容器组都投入运行时，由于两组电容器组的配置相同，所以在两组电容器组并联后的等效电容器支路上， $X_L' = X_L/2$ ， $X_C' = X_C/2$ 。等效电容器组和系统侧的并联谐振次数理论值 $h_{12} = \sqrt{\frac{X_C'}{X_L + X_L'}}$ ，把变电站的实际运行参数代入后得到 $h_{12} = 3.032 7$ ，该数值非常接近于3。

因此通过理论计算可知，3次谐波电流被放大是因为发生了3次并联谐振，使得电容器支路电流大大超过电容器和电抗器的额定值，长时间运行就会导致电容器介质击穿、串联电抗器匝间绝缘破坏甚至烧毁<sup>[11]</sup>。

由以上分析可知，该110 kV变电站电容器组串联电抗器发生烧毁的主要原因是系统与电容器组发生了3次并联谐振。

解决方案

1. 串联电抗器的选取原则

电抗器的选择原则应该是使所在网络内占比例最高的谐波分量的相应总电抗值接近于零，也就是应该使该次谐波分量的感抗和容抗接近相等，即需满足关系式 $X_L > X_C/n^2$ 。例如系统中以5次谐波为主，则 $X_L > X_C/5^2 = 0.04X_C$ ；如系统中以3次谐波为主，则 $X_L > X_C/3^2 = 0.11X_C$ 。所以，在实际应用中如主要为了抑制5次及以上的谐波，常选用电抗值为（5%~6%） $X_C$ 的串联电抗器；而如果主要为了抑制3次及以上谐波，常选用电抗值为（12%~13%） $X_C$ 的串联电抗器。值得注意的是： $X_C$ 和 $X_L$ 不能完全相等，否则会产生电磁谐振，导致产生过电压。一般而言，为了既能避开谐振点，又能抑制谐波，会选择较容抗稍大的感抗。

从上节仿真可知，当串联6%电抗器时，在投入两组电容器后，系统发生了3次并联谐振，使得流入系统和电容器组的3次谐波被放大很多倍，这样极容易导致电抗器烧毁。由于谐波源中的3次、5次和7次谐波比较大，尤其是5次谐波很大，因此原有方案选择串联6%电抗器以抑制5次谐波，结果却发生了3次并联谐振，下面将改为选用电抗值为（12%~13%） $X_C$ 的串联电抗器进行进一步的仿真分析。

2. 改变串联电抗器的仿真分析

将串联电抗由1 Ω变为2.17 Ω（串联13%电抗器）进行仿真，表5列出了不投电容器、同时投入串联6%电抗器的电容器组和同时投入串联13%电抗器的电容器组这3种情况下流入系统的各次谐波电流值。由表5中可以看出，串联一个13%的电抗器后，流入系统中的谐波电流除了2次谐波有轻微放大之外，其他次谐波都比谐波源的谐波电流小，起到了抑制电网谐波的作用。对比串联6%和13%电抗器后流入系统的谐波电流，在不考虑3次谐波电流的情况下，可知串联6%电抗器抑制谐波效果比13%电抗器的效果好，但串联6%电抗器后3

次谐波电流被放大16.814 2倍，因此综合考虑，选用13%串联电抗器更合适。

表5 投入两组电容器后不同情况下流入系统的各次谐波电流值

| 谐波次数 | 投入前电流          | 串联6%电抗器电流       | 串联13%电抗器电流       |
|------|----------------|-----------------|------------------|
| $n$  | 稳定值 $I_{in}/A$ | 稳定值 $I_{in}'/A$ | 稳定值 $I_{in}''/A$ |
| 2    | 8              | 10.766          | 13.473           |
| 3    | 26             | 437.168         | 7.298            |
| 4    | 3              | 0.136           | 1.743            |
| 5    | 40             | 11.786          | 25.947           |
| 6    | 2              | 0.801           | 1.354            |
| 7    | 28             | 12.603          | 19.371           |
| 8    | 1.5            | 0.717           | 1.051            |
| 9    | 4              | 1.981           | 2.823            |
| 11   | 3              | 1.544           | 2.133            |
| 13   | 4              | 1.488           | 2.130            |

表6为串联6%电抗器和串联13%电抗器这两种情况下流入电容器组的各次谐波电流值。通过比较可知，除了2次谐波外，串联13%电抗器后流入电容器组的谐波电流值比串联6%电抗器时的小，尤其是3次谐波，从210.342 A降为9.350 A，从而不会烧毁电抗器。

表6 投入两组电容器后不同情况下流入电容器组的各次谐波电流值

| 谐波次数 | 串联6%电抗器           | 串联13%电抗器           |
|------|-------------------|--------------------|
| $n$  | 电流稳定值 $I_{in}'/A$ | 电流稳定值 $I_{in}''/A$ |
| 2    | 1.387             | 2.743              |
| 3    | 210.342           | 9.350              |
| 4    | 1.566             | 0.630              |
| 5    | 14.099            | 7.018              |
| 6    | 0.599             | 0.323              |
| 7    | 7.688             | 4.305              |
| 8    | 0.391             | 0.223              |
| 9    | 1.005             | 0.584              |
| 11   | 0.721             | 0.426              |
| 13   | 0.738             | 0.418              |

由此可知，该110 kV变电站选择串联13%电抗器的电容器组能有效抑制流入系统的谐波，而且不会导致串联电抗器烧毁。

结束语

该110 kV变电站为了抑制5次谐波，并联电容

补偿系统采用6%串联电抗器，结果却发生了3次并联谐振，3次谐波电流被严重放大，导致串联电抗器烧毁。而当改为采用13%串联电抗器时，则能有效抑制各次谐波，且有利于系统运行。所以并联电容器组在选取配套串联电抗器时，首先要了解系统的谐波源以及系统参数，然后对串联电抗器的各种参数方案进行必要的仿真分析，利用仿真结果作为指导，综合考虑各方面影响因素，最终选择最恰当的电抗器值，达到既有效抑制系统谐波，又防止电抗器烧毁的目的。

参考文献

[1] 李小伟. 电容器组串联电抗器烧毁的原因分析与建议[J]. 广西电力, 2009(1): 62-72.

[2] 胡杰. 变电站10 kV电容器组串联电抗器故障分析[J]. 现代建筑电气, 2012(5): 27-29.

[3] 王欣. 变电站并联电容器组故障分析及整治方案[C]. 云南电力技术论坛论文集, 2011: 1-12.

[4] 韩成永. 串联电抗器运行常见故障的原因分析[J]. 电气制造, 2011(10): 76-78.

[5] 陶梅, 江钧祥. 串联电抗器及其电抗率的选取[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(3): 58-61.

[6] 袁建英. 用户电容器组串联电抗器烧毁分析[J]. 江苏电机工程, 2010, 29(6): 66-70.

[7] 周行星, 司文荣, 张洋, 等. 电网谐波含量对补偿电容器组电流有效值的影响[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(3): 6-9.

[8] 邓飞, 陆慧玲. 并联电容器补偿与谐波抑制[J]. 上海电力, 2011(6): 475-477.

[9] 陈薪羽, 马维勇. 一起220 kV变电站并联电容器装置故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(2): 62-67.

[10] 周挺, 李雪松. 变电站并联电容器装置的电抗率配置[J]. 华东电力, 2011, 39(12): 2080-2083.

[11] 周元祺. 并联电容器对谐波的放大及解决措施[J]. 华东电力, 2009, 37(12): 2064-2066.

(收稿日期: 2014-12-26) EA