

低压配电并联电容器补偿回路所串电抗器的合理选择

一、 前言

在笔者所接触的低压配电施工图中，发现施工图中有一个共性，那就是配电变压器低压侧母线上均接入无功补偿电容器柜。但令人费解的是，所串电抗器无任何规格要求，无技术参数的注明，只是在图中画了一个电抗器的符号而已。而所标电容器的容量，也只是电容器铭牌容量而已，实际运行时，最大能补偿多少无功功率，也不得而知。

应引起注意的是，电抗器与电容器不能随意组合，它要根据所处低压电网负荷情况，变压器容量，用电设备的性质，所产生谐波的种类及各次谐波含量，应要进行谐波测量后，才能对症下药，决定电抗器如何选择。但往往是低压配电与电容补偿同期进行，根本无法先进行谐波测量，然后进行电抗器的选择。退一步说，即使电网投入运行，进行谐波测量，但用电设备是变动的，电网结构也是变化的，造成谐波的次数及大小有其随意性，复杂性。因此正确选用电容器所用的串联电抗器也成为疑难问题，这无疑是一个比较复杂的系统工程，不是随便一个电抗器的符号或口头说明要加电抗器那么简单了。不得随意配合，否则适得其反，造成谐波放大，严重时会引起谐振，危及电容器及系统安全，而且浪费了投资。有鉴于此，笔者对如何正确选用电容器串联电抗器的问题，将本人研究的一点心得，撰写成文，以候教于高明。

二、 电力系统谐波分析及谐波危害

电力系统产生谐波的原因主要是用电设备的非线性特点。所谓非线性，即所施电压与其通过的电流非线性关系。例如变压器的励磁回路，当变压器的铁芯过饱和时，励磁曲线是非正弦的。当电压为正弦波时，励磁电流为非正弦波，即尖顶波，它含有各次谐波。非线性负载的还有各种整流装置，电力机车的整流设备，电弧炼钢炉，EPS，UPS 及各种逆变器等。目前办公室里电子设备很多，这里存在开关电源及整流装置，其电流成分也包含有各次谐波，另外办公场所日光灯及车间内各种照明用的气体放电灯，它们也是谐波电流的制造者。日光灯铁芯镇流器及过电压运行的电机也是谐波制造者。

目前所用的配电变压器高压侧多接成“ Δ ”型，这样三次谐波因相序相同，即零序的感应的三次谐波电流在三角形绕组内环流，不易窜入电网。磁路过饱和而产生的谐波类似六脉动整流回路，主要产生 $6K \pm 1$ 次谐波，多为 5 次，7 次，11 次等。据有关人员实测表明，电力机车及电弧炉供电系统 3 次谐波较多，而办公楼及普通工厂车间 5 次与 7 次谐波为主。由于低压配电不涉及电弧炉及电力机车，这样矛盾的焦点集中于 5 次谐波治理抑制上了。

谐波造成的设备过载及线路损耗增加，降低了输电能力，高次谐波电流又引起系统电压畸变，从而影响其它设备的正常工作。

对于低压电网的补偿用电力电容器，危害更为严重。深圳某电子厂，由于低压电网谐波，接入的并联补偿电容器，运行不到一周，皆鼓肚损害，其接头及投切用接触器接线端子烧蚀熔化冒火，电气值班人员只得采用电气用手提灭火设备进行灭火，然后退出运行。电容器生产厂家亲赴现场用谐波测试仪实测，结果证实是谐波严重造成，而非电容器质量所致。

三、 串联电抗器的作用

低压电网并联电容器补偿回路串联电抗器的作用

电抗器作用为：

1) 限制电容器投入时合闸涌流

当电容器投入的瞬间，由于电容器无充电，无反向电势，合闸瞬间，如同短路，只有线路的阻抗起限制电流作用，因此瞬时电流可达额定电流的百倍以上，不过时间短促，仅持续毫秒或微秒级。由于接入电网的电容器为多组组合，当投入或切除任一组电容器时，其它运行的电容器会向投切电容器进行充放电，这也是俗称的电容器组背对背效应，增加了电容器的投切困难。尽管目前采用电容器投切专用接触器，此接触器带有操作时接入的过渡电阻进行限流，但还是经常损坏接触器，电容器柜内投切用接触器可谓十足的易损元件了。

2) 防止电网谐波放大及谐振的发生

3) 限制操作过电压

4) 限制短路电流

当电容器发生短路故障时，能限制系统向电容器短路点注入短路电流。当系统其它地方发生短路或电抗器电源侧发生短路时，能限制电容器向系统的反馈电流。

5) 抑制流向电容器的高次谐波，使之不使电容器过电流损坏。

众所周知，谐波次数越高，电容器呈现的阻抗越低，这样造成大量谐波电流涌入。若不采取措施，如对电网采取谐波控制或串联电抗器，电容器很难胜无功补偿作用，很快由于涌波涌入造成过流而损坏。

6) 对某次谐波来说，串联电抗器与电容器的组合，只要合理搭配，可起到滤除部分某次谐波的作用。

需要指出的，滤除某次部分谐波，只是补偿回路的一点附加作用，绝不能作为滤波器使用，否则，则影响了无功补偿的初衷。

有人会疑问，不是防止电容器过流，要限制电容器谐波涌入吗，怎么又允许某次谐波容易涌入呢？问题很容易解答，电容器允许使用在电流达 1.35 倍额定电流下长期工作，可充分挖掘这部分潜力，让它兼有一点滤波的作用。另外，电抗器与电容器要合理搭配，不得使电抗器与电容器发生串联谐波，使之回路电流达到短路电流水平而损坏元件的设备，也不能使电抗器与电容器串联回路呈容性，以便防止回路系统与系统感抗发生并联谐振而使谐波被放大污染系统。

四、 串联电抗器的正确选择

要正确选用电抗器，首先要了解所在电网谐波情况，或经测量（这对新建单位是不现实的）或根据电网结构，用电设备情况，预测电网谐波情况，然后再决定电抗器的参数。电抗器选择原则是，若想兼有滤除某次谐波作用，应使电抗与电容接近串联谐振，而达到谐振的条件是电抗与容抗相等，即 $nX_L = X_C/n$, $X_L = X_C/n^2$ 式中， n 为谐波次数， $X_L \cdot X_C$ 为电抗器与电容器工频电抗。

1. 如果电网清洁，各高次谐波含量很少，可选择电抗率 K 为 0.1%—1%。这样，电抗体积小，成本低，但能限制合闸涌流为额定电流的 10 倍以内。

2. 如果电网 3 次谐波突出, 除限制涌流外, 尚能滤除部分 3 次谐波, 以便清洁电网。

选择的原则是, 即使电容电抗接近谐振, 但不能达到谐振。

如果达到谐振, 对 3 次谐波而言,

$$3X_L = X_C/3, \quad X_L = X_C/9 = 0.111X_C$$

$$\text{对于 5 次谐波 } X_L = X_C/25 = 0.04X_C$$

$$\text{对于 7 次谐波 } X_L = X_C/49 = 0.0204X_C$$

$$\text{对于 9 次谐波 } X_L = X_C/81 = 0.012X_C$$

$$\text{对于 11 次谐波 } X_L = X_C/121 = 0.0083X_C$$

上述各式中, X_L 及 X_C 为基波 (工频) 情况下, 电抗器及电容器的阻抗。满足上述条件是电抗与电容发生谐振的条件, 选用时以不得发生谐振为前提, 但不使谐波被放大, 应使回路呈感性。

现引入一个参数, 即电抗率 K , 它是串联回路的电抗器的电抗与电容器的容抗之比的百分数, 即 $K = X_L/X_C\%$

由此可见, 发生串联谐振时, 分别对 3 次, 5 次, 7 次, 9 次及 11 次谐波, 电抗率分别为 11.1%, 4%, 2.04%, 1.2% 及 0.83%。

但选择电抗器电抗率时, 不但要接近谐振频率, 还要使回路呈感性。这样一来, 若电网 3 次谐波突出, 选电抗率 K 为 12%~13%。若 5 次谐波突出, 选 K 为 4.5%~7%。若 5 次与 3 次均突出, 选取电容器组分别串电抗率 K 为 4.5%~7% 及 12%~13% 的电抗器。

至于电抗器的容量, 它等于所串电容器容量乘以电抗率, 即 $Q_L = KQ_C$ 。一般说来, 只要给出所接电容器容量及额定电压, 及要求的电抗器电抗率。至于电抗器额定绝缘电压、容量及额定电流等参数, 由电抗器制造厂自行合理地解决了, 不必要求用户提供其它要求参数。

五、 串入电抗器后, 电容器端电压及补偿容量的变化

由于系统电压不变, 而电抗器压降又与电容器上压降刚好相位相反, 这样必然造成电容器端电压升高。由于电抗率是电抗器电抗值与电容器容抗值之比的百分数, 电抗器上的压降必然为电容器上的压降乘以电抗率了。

$$\text{即 } U_C - U_L = U_N \quad (U_C, U_L, U_N \text{ 分别为电容器, 电抗器及系统电压})$$

$$U_c - kU_c = U_N$$

$$U_c(1-k) = U_N$$

$$U_c = U_N / (1-k)$$

由此可见，串电抗后，电容器电压升高非 $1+k$ 倍，而是 $1/(1-k)$ ，这样，串入电抗后，电容器端电压升高，其升高倍数如表所示。

电抗率 K	0.1%	1%	4.5%	5%	6%	7%	12%	13%
电容器电压升高倍数	1.001	1.01	1.047	1.0526	1.0638	1.075	1.136	1.149

由于电抗器吸收电容器所产生的无功补偿功率，造成电容器向电网无功补偿能力减弱。

由于串电抗造成电容器端电压升高，必须采用适合此电压的电容器，即选用较高电压等级的电容器。这样组合下来，实际电压又不一定正巧与所选电容器额定电压一级，一般都小于电容器额定电压。由于电容器在小于额定电压下运行，实际补偿容量又低于电容器铭牌所标容量，真是一环扣一环，是一个比较复杂的系统工程了。为说明上述问题，现举例如下：

某项目，系统电压 $U_N=400\text{v}$ 。每回路补偿电容器为 30Kvar ，串入电抗率 $K=7\%$ ，求：电容器运行时实际电压，如何选择电容器额定电压及实际补偿容量。计算步骤为：

1) 电容器实际承受电压 $U_c = U_N / (1-k) = 400 / (1-7\%) = 430\text{v}$

选择电容器额定电压为 480v （选 440v ， 450v 的也能满足要求），电抗器实际压降为 $U_L = 430\text{v} - 400\text{v} = 30\text{v}$ ，或 $U_L = kU_c = 7\% * 430 = 30\text{v}$ 。

2) 额定电压 480v 电容器，实际承受电压为 430v ，实际生产的无功功率为额定无功的 $(430/480)^2 = 0.8025$ 倍。自身发出的无功 $Q = 30 * 0.8025 = 24.075$ (Kvar)

3) 电抗器吸收电容器发出的无功功率的 7%

4) 电容器实际向电网发出额定功率的 $0.8025 * (1-7\%) = 0.7463$ 倍，即 $30 * 0.7463 = 22.39$ (Kvar)

5) 电容器串入电抗器后实际电流

如上述的例子， 30Kvar 电容器，额定电压 480v ，额定电流为

$$I_N = 30 / (\sqrt{3} * 0.48) = 36.1\text{A}$$

实际运行时，承受电压为 430v 。

$$\text{实际电流为 } I = I_N * (430/480) = 36.1 * (430/480) = 32.3\text{A}$$

或者 $I=Q/(\sqrt{0.43})=24.075/(\sqrt{0.43})=32.3A$

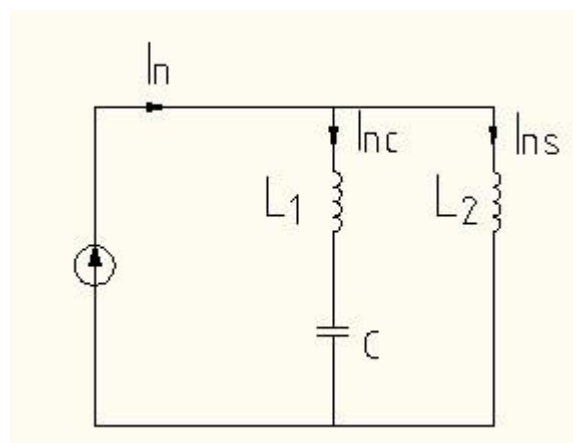
这样，选择回路导体及投切元件只能按 32.3A 选择，不能按系统电压 400V，电容器 30Kvar 求得。对于额定电压 400V，容量 30Kvar 的电容器，其电流都为 $I=30/(\sqrt{0.4})=43.3A$ 。

通过上述事例，可以看出串电抗器并联补偿电容器回路，各参数要通过计算求得。到底补偿多少，有没有达到设计要求，要有明确的交代。目前设计单位只要求电抗器，其它不再过问，即电气成套厂更加随意，为节约投资，电抗率选用电抗率宁低勿高，宁选铁芯电抗器而不选空芯电抗器。电容器柜铭牌上的补偿容量按各电容器铭牌容量之和，这样一样来和实际情况差别太远了。

六、 严防补偿电容器对谐波放大

接入母线的无功补偿用电容器，电容电抗系统能与电力系统组成并联谐振回路。如果某次谐波电流频率，电容电抗会流过很大的谐振电流，可达原有电网谐波电流数十倍，电容器端电压也产生很高过电压，此种情况称为谐波放大。

当系统存在谐波时，并联补偿用电容器支路串入电抗器，而系统若忽略电阻，则安全呈感性，可用等效电感表示。等效电路图见图一。



图一. 等效阻抗图

图中 I_n 为系统某次谐波电流，也看作由一恒流源发出， L_2 为系统等值电感， L_1 为电容器所串电抗器电感， C 为补偿电容的电容。流入系统的谐波电流为 I_{ns} ，流入电容器的谐波电流为 I_{nc} ，由此可得

$$I_{ns} = I_n * (j\omega L_1 + 1/j\omega C) / (j\omega L_1 + 1/j\omega C + j\omega L_2)$$
$$= I_n / \{ 1 - [\omega L_2 / (1/\omega C - \omega L_1)] \}$$

如果 $\omega L_2 / (1/\omega C - \omega L_1) = 1$ 时， $I_{ns} \rightarrow \infty$

即 $1/\omega C - \omega L_1 = \omega L_2$ 时，进入系统的某次谐波被放大至无穷大。

L_2 是系统参数，不能人为变动，为避免谐波被放大，所选电容器与所串电抗器参数应合理搭配。从上式也可看出，只要 $1/\omega C - \omega L_1 < 0$ ，即电容器串联电抗器回路只要对某次谐波呈感性，此谐波就不会被放大进入系统，流入系统的谐波小于原有系统存在的谐波，也就是说，串联电抗器回路有对某次谐波的吸收功能。当然，不希望各次谐波均涌入电容器，把电感电容回路当成滤波器，否则电容器容易烧坏，从而丧失无功补偿功能，不要忘记，此时电容器主要承担系统无功补偿功能。