

# 低压电能质量监控及无功自动补偿装置

陈 津

摘要：着重介绍近几年来我国及我公司智能型低压无功补偿装置的发展、新产品、新技术和开发动态，以及我公司在低压滤波器装置的发展，并对设计中的若干技术问题如补偿方式的选择、投切元件的选择等加以讨论。

关键词：低电压；无功补偿；技术方案

## 1、 前言

近年来，在城乡电网改造的实施过程中，低压并联电容器无功补偿装置的设计方案有了重大的改进和突破，尤其是近两年国家对电网质量的严格要求，使得单纯的低压并补发展到抑制谐波型并补和专业的低压动态滤波器 TSC，并取得了满意的运行效果。对提高供电电压质量，挖掘供电设备的潜力、降低线路损失及节能均起到积极的作用。本文就我公司电能质量监控及无功自动补偿装置开发中的若干技术问题和发展方向进行讨论，以供参考。

## 2、 低压补偿的改进

低压无功补偿的传统模式主要有以下三种型式，①装于低压电动机旁的单台就地补偿；②装于配电变压器低压侧的补偿箱及柱上式补偿装置；③装于企业配电房或车间、箱变内及高层建筑楼层配电间的自动补偿柜（如最早的 PGJ 柜，以及后来的 GGD、GCK 等）。根据我公司低压补偿装置的发展情况，在此对单台就地补偿问题不作讨论。低压补偿箱和补偿柜的技术改进和新技术应用归纳起来主要有以



下几方面：

- (1) 由三相共补到分相补偿，以求达到更理想的补偿效果；
- (2) 由静态补偿发展到动态补偿；
- (3) 智能型自动补偿控制器和配电变压器的运行记录仪相结合；
- (4) 将低压补偿的功能纳入欧式箱变及美式箱变的低压部分；
- (5) 采用不锈钢或复铝锌板的箱体，具有防寒、防晒、密封、防潮、防火、防锈等特点
- (6) 选用微晶蜡介质或干式及充 SF6 的自愈式并联电容器，提高了运行的可靠性，并延长了使用年限；
- (7) 由单一的无功补偿到同时具有滤波及抑制谐波功能的补偿装置。

### 3、 三相共补及分相补偿结合的接线

#### 3. 1 三相共补的接线（ $\Delta$ ）

传统的低压补偿都是采用三相共补的方式，它是根据控制器统一取样判断，各相投入相同的补偿容量，接线如图 1 所示。此方式适用于三相负载基本平衡，各相负载的  $\cos\Phi$  相近的网络。一般电容器都选用 $\Delta$ 接线，额定电压为 400V。

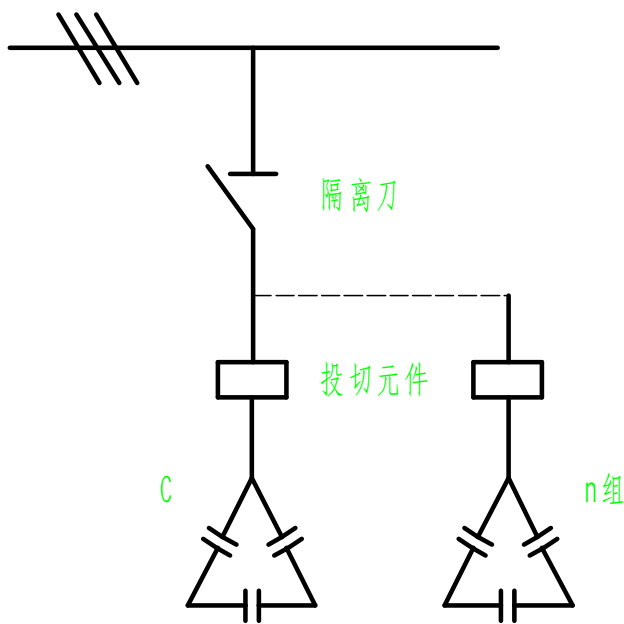


图 1 电容器 $\Delta$ 接三相共补的接线

### 3. 2 三相分补的接线 (Y)

三相分补方式就是各相分别取样，各相分别投入不同的补偿容量，接线如图 2 所示。此方式适用于三相负载不对称，其  $\cos \Phi$  值也有较大差别场合。一般电容器都选用 Y 接线，额定电压为 230V。

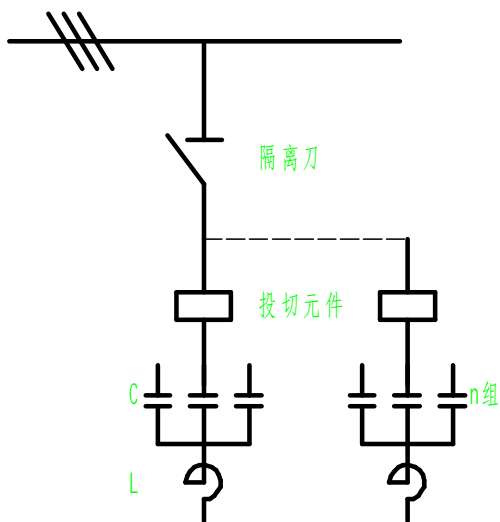


图 2 电容器 Y 接三相分补的接线



### 3. 3 三相共补及分相补偿结合的接线 ( $\Delta$ -Y)

此方式是前两者的结合,即三相共补与三相分补相结合的接线方式,接线如图 3 所示。三相共补部分的电容器为 $\Delta$ 接线,三相分补部分的电容器为 Y 接线,此方式适用于各种网络。这种接线方式的补偿装置,运行方式机动灵活。

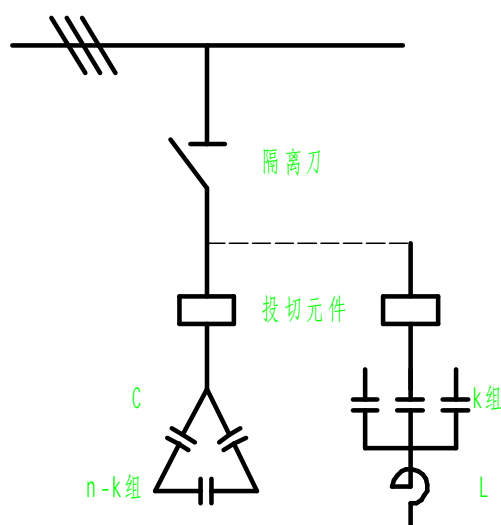


图 3 电容器 $\Delta$ -Y 接三相共补与三相分补相结合的接线

### 3. 4 对三种接线方式的探讨

- (1) 从补偿效果来看:三相共补及分相补偿结合的接线( $\Delta$ -Y)的效果最好,最灵活;三相分补接线(Y)效果较差;三相共补接线( $\Delta$ )效果最差。
- (2) 从经济角度来看:三相共补接线( $\Delta$ )的价格最经济;三相共补及分相补偿结合的接线( $\Delta$ -Y)的价格较贵;三相分补接线(Y)的价格最贵。其原因是:①额定电压 400V 的自愈式电容器的价格比同容量额定电压 230V 的电容器



便宜得多，这是由于原材料价格的原因和 400V 电容器极间工作电场强度较高的缘故。以 400V 的电容器为例，用厚  $8\mu\text{m}$  金属化膜时，工作场强为  $50\text{kV}/\text{mm}$ ，如用厚  $7\mu\text{m}$  金属化膜时，工作场强为  $57\sim 58\text{kV}/\text{mm}$ ；而 230V 电容器，如要维持与上述的工作场强相近时，则必须选用更薄的金属化膜，但  $4\sim 5\mu\text{m}$  薄膜的价格要比  $7\sim 8\mu\text{m}$  薄膜贵得多，所以对 230V 电容器一般是采取降低工作场强的设计，按照国内市场上的通常价格，同容量的 230V 电容器的价格是 400V 电容器价格的 2 倍以上。所以在三相共补及分相补偿结合的接线 ( $\Delta$ -Y) 中，对于分相补偿部分有时也选用 400V  $\Delta$  接电容器，这时电容器实际输出容量是其铭牌上额定容量的  $1/3$ 。这样做的目的是由于 400V 的产品比较便宜，即使实际容量比额定容量下，但由于工作场强低，寿命长，且整个装置只用一个规格的电容器，互换性强等优点。

#### 4、 并联电容器的投切元件

##### 4. 1 交流接触器

70~80 年代广泛应用的 PGJ 补偿柜，都是采用交流接触器作为投切元件，迄今仍沿用。这是我公司低压补偿装置的第一代产品，如图 4 (a) 所示。其优点是：使用专用于电容投切的接触器带有抑制涌流装置，不用加装电抗器就能将合闸涌流峰值限制在额定电流的 20 倍以下，能有效地抑制合闸涌流对电容器的冲击和抑制开断时的



过电压。体积较小，价格低。

其缺点是：①投入电容时产生倍数较高的涌流，容易在接触器的触点处产生火花，烧损触头；②切断电容时，容易粘住触头，造成拉不开；③涌流过大对电容器本身有害，影响使用寿命。

#### 4. 2 可控硅（双向晶闸管）

采用双向晶闸管的无触点开关电路取代交流接触器，是我公司低压补偿装置的第二代产品，如图 4（b）所示。其优点是：充分利用可控硅的优良特性，响应及时迅速，实现了对电容的等电位投入，零电流切除。彻底克服了普通交流接触器等机械点投切电力电容器时涌流大、电压冲击大、打火、振动等缺点。

其缺点是：①成本高，是采用接触器投切的补偿柜贵 70%~90%左右；②可控硅开关电路运行时有较大的压降，运行中的电能损耗和发热问题不可忽视。以 BSMJ0.4-30-3 并联自愈式电容器为例，基额定电流为 43.3A，目前做得最好的可控硅并关的电压降也只能为 1V，如果不 3 个可控硅开关电路运行时，损耗的功率为： $P=3 \times 1 \times 43.3=129.9\text{W}$ ，如补偿柜的无功功率为 90kvar，则全投入时，可控硅的功率损耗为  $P=129.9 \times 3=389.7\text{W}$ ，以每天平均 10 小时计，日耗电量达 3.897kW·h，年耗量约为 1423 kW·h。有功消耗的发热量还会增加整个补偿装置的温升，必须采用相应的散热降温的措施，如采用接触器基本上不消耗有功；③可控硅电路本身也是谐波源，大量的应用会对低压电网的波形不利。

#### 4. 3 晶闸管和二极管反并联的开关电路



是由一个晶闸管和一个二极管反并联的接线方案。我公司不采用此方式。此方案与 4. 2 方案技术性能相近，但反应时间较慢。

#### 4. 4 复合开关

是我公司第三代产品，如图 4 (c) 所示是前两者的结合体。其运行操作顺序如下：当投入电容时，先由微电脑控制器发出信号给开关电路（可控硅），使之在等电压时投入电容器，微电脑控制器紧接着又发信号给接触器，使其触点也闭合，将可控硅开关电路短路，由于接触器闭合后的接触电阻远小于开关电路导通时的电阻，从而达到了节能和延长可控硅使用寿命的目的；当需要切除电容器时微电脑控制器先发信号可接触器，使接触器断开，此时可控硅电路处于导通状态，并由开关电路在电流过零时切除。其优点是：运行功耗低，涌流小，谐波影响小，成本低，寿命长。

其缺点是：容量小，目前最大额定电流只有 80A（限集成式）

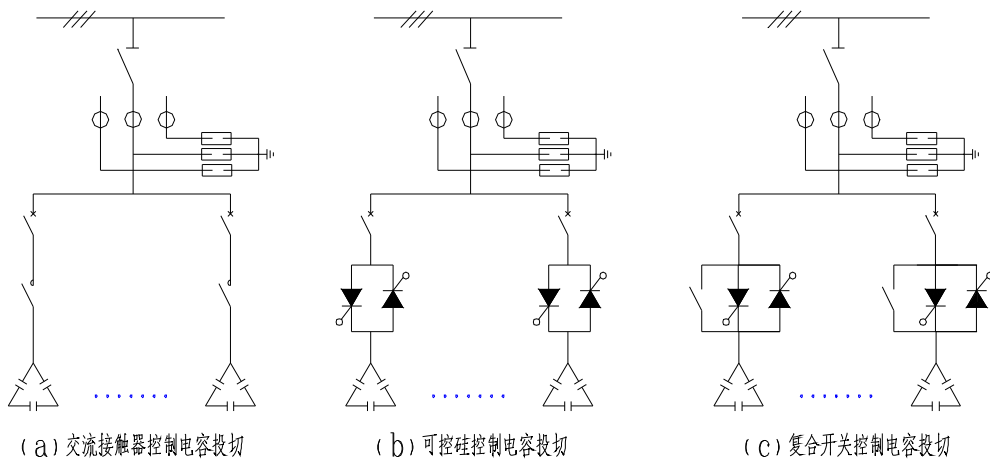


图 4 接线图

## 5、 智能型自动控制器

### 5. 1 检测量和控制目标



检测量主要有  $\cos \Phi$ 、无功功率  $Q$  和无功电流  $I_q$  三种，70~80 年代多选用以  $\cos \Phi$  为检测量的控制器，此方案在轻载时容易产生投切震荡，重载时又不易达到充分补偿；目前新型的控制器已不再选用以  $\cos \Phi$  为检测量。检测量为  $Q$  的控制器，其工作原理是将电压和电流的信号送入霍尔元件或相敏放大器等具有乘法功能的器件，以测出  $Q=UI\sin \Phi$ ，由于检测量和控制目标都是同一物理量，技术上是合理的，但检测难度要大些。检测量为  $I_q$  的控制器，利用了相电压  $U$  由正到负过零的瞬间，恰好就是 A 相无功电流最大值  $I_{q\max}$  的原理，用相电压  $U$  负过零信号控制，采用开关和简单的保持电路，以完成对  $I_q$  实时检测；这种方案检测方法简单，不会产生震荡，补偿效果与电网电压的波动无关。

## 5. 2 谐波型智能控制器

它与普通的无功自动补偿控制器的接线都是一样，是无功自动补偿控制器和配电综合电能测控仪的结合体。

具有自动/手动/远控切换方式(远控通过 RS232 通讯口与计算机相联并用计算机控制投切，配有后台软件)，谐波电流、谐波电压监测，过压、欠压保护，其整定值可调，时间 0~5 分可调，输出接点容量不小于 5A. 220V / 支路。

- A、按电网无功需求量，电流电压、功率因数自动转换。
- B、取样信号：电压 380V ( $U_{ac}$ ) 电流 5A
- C、投切延时 0~10 分钟可调节，既能顺序投切又能编码投切。
- D、显示投切路数
- E、显示部分：功率因数、无功、有功、电压、功率因数设定值、过电压设定值、投切延时时间、时间日期等常规数据。





F、带记忆储存：自动记录每组电容器的运行时间和投切次数；设置参数不怕掉电、数据记录保存。

谐波型的与普通型的不同在于，投切顺序的不同。普能型的只是依次循环投切。谐波型的，如控制 10 路，H5、H7、H11。

控制路数为：10 路。具体分为 3 组，即 5 次通道为第一组（1、2、3），7 次通道为第二组（4、5），11 次通道为第三组（6、7、8、9）。注：要求在一（1、2、3）、二（4、5）、三（6、7、8、9）组中分别为循环顺序投切，先投先切。

投切方式为：投入时，由低次向高次投，即依次投 1、2、3、4、5、6、7、8、9；切除时，由高次向低次切除，即依次切 6、7、8、9、4、5、1、2、3（6、7、8、9 为循环顺序投切，4、5 为循环顺序投切，1、2 为循环顺序投切）

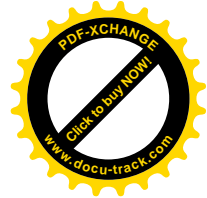
## 6、根据使用环境不同，对补偿装置的选择

根据我公司遇到的情况及经验，我们对低压无功自动补偿装置的选择提出以下考意见：

- （1）根据网络情况选择不同接线的补偿方式。
- （2）分配补偿容量以细为原则。即每级容量越小越好。
- （3）根据使用环境不同，作有针对性的选择。对有谐波污染的系统应采用具有滤波及抑制谐波功能的补偿装置；对谐波污轻的系统可采用具有抑制谐波功能的补偿装置即可。
- （4）选型指南

### A. 补偿容量的确定

补偿容量的确定可以根据负荷的最大功率、补偿前的功率因数及要求补偿后达到的功率因数，用下式计算确定：



$$Q = \alpha * P * (\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$$

式中：Q — 所需补偿的总无功功率，kvar；

$\alpha$  — 平均负荷系数，取 0.7~0.8；

P — 用户最大负荷，kW；

$\phi_1$  — 补偿前平均功率因数角

$\phi_2$  — 补偿后平均功率因数角

或  $Q = \alpha * P * q$

q — 补偿率，kvar / kW （可从附表中查取）

附表：每 kW 负荷所需无功补偿率值查取表

cos $\phi_1$	cos $\phi_2$																
	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96
0.50	0.981	1.008	1.035	1.060	1.086	1.117	1.138	1.166	1.192	1.219	1.246	1.276	1.305	1.338	1.368	1.404	1.442
0.51	0.939	0.966	0.933	1.018	1.044	1.070	1.106	1.134	1.160	1.187	1.214	1.244	1.273	1.306	1.336	1.372	1.410
0.52	0.890	0.917	0.945	0.969	0.995	1.021	1.047	1.075	1.101	1.128	1.155	1.185	1.217	1.247	1.277	1.313	1.351
0.53	0.819	0.876	0.903	0.928	0.954	0.980	1.006	1.034	1.060	1.087	1.114	1.144	1.173	1.120	1.206	1.236	1.272
0.54	0.808	0.835	0.862	0.887	0.913	0.939	0.965	0.993	1.019	1.046	1.075	1.103	1.133	1.165	1.195	1.231	1.269
0.55	0.766	0.793	0.820	0.815	0.871	0.897	0.923	0.951	0.977	1.004	1.031	1.061	1.090	1.123	1.153	1.189	1.227
0.56	0.728	0.755	0.782	0.807	0.829	0.859	0.885	0.913	0.939	0.966	0.991	1.023	1.052	1.085	1.115	1.151	1.189
0.57	0.691	0.718	0.745	0.770	0.796	0.822	0.846	0.876	0.902	0.929	0.956	0.986	1.015	1.048	1.078	1.114	1.520
0.58	0.655	0.682	0.709	0.734	0.760	0.786	0.812	0.840	0.866	0.893	0.920	0.950	0.979	1.012	1.042	1.078	1.116
0.59	0.618	0.645	0.672	0.697	0.723	0.749	0.775	0.803	0.829	0.856	0.883	0.913	0.942	0.975	1.005	1.041	1.079
0.60	0.583	0.610	0.637	0.662	0.688	0.714	0.740	0.768	0.794	0.821	0.848	0.878	0.905	0.940	0.970	1.006	1.044
0.61	0.549	0.576	0.603	0.628	0.654	0.680	0.706	0.734	0.760	0.787	0.841	0.844	0.873	0.906	0.936	0.972	1.010
0.62	0.515	0.547	0.560	0.594	0.620	0.640	0.672	0.700	0.726	0.753	0.780	0.810	0.839	0.872	0.902	0.938	0.974
0.63	0.481	0.508	0.535	0.560	0.586	0.612	0.638	0.666	0.692	0.719	0.746	0.776	0.805	0.838	0.868	0.904	0.942
0.64	0.450	0.477	0.504	0.529	0.555	0.581	0.607	0.635	0.661	0.688	0.715	0.745	0.774	0.807	0.837	0.873	0.911



cos $\phi_1$	cos $\phi_2$																
	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96
0.65	0.417	0.444	0.471	0.496	0.522	0.548	0.574	0.602	0.628	0.655	0.682	0.712	0.741	0.774	0.804	0.840	0.878
0.66	0.386	0.415	0.442	0.467	0.493	0.519	0.545	0.573	0.599	0.626	0.654	0.683	0.712	0.745	0.775	0.811	0.849
0.67	0.357	0.384	0.411	0.436	0.462	0.488	0.514	0.542	0.566	0.595	0.622	0.652	0.681	0.714	0.744	0.780	0.818
0.68	0.327	0.354	0.381	0.406	0.432	0.458	0.484	0.512	0.538	0.565	0.594	0.622	0.651	0.684	0.717	0.750	0.788
0.69	0.297	0.324	0.351	0.376	0.402	0.428	0.454	0.482	0.508	0.535	0.562	0.592	0.621	0.654	0.683	0.720	0.758
0.70	0.270	0.297	0.323	0.349	0.375	0.401	0.427	0.455	0.481	0.508	0.535	0.565	0.594	0.627	0.657	0.693	0.731
0.71	0.241	0.268	0.295	0.320	0.346	0.372	0.398	0.426	0.452	0.479	0.506	0.536	0.565	0.598	0.628	0.664	0.720
0.72	0.212	0.239	0.266	0.291	0.317	0.343	0.371	0.397	0.425	0.450	0.477	0.507	0.536	0.569	0.599	0.635	0.673
0.73	0.185	0.212	0.239	0.264	0.290	0.316	0.342	0.370	0.396	0.423	0.450	0.480	0.509	0.542	0.572	0.608	0.646
0.74	0.157	0.184	0.211	0.236	0.262	0.288	0.315	0.342	0.368	0.395	0.425	0.452	0.481	0.514	0.546	0.580	0.618
0.75	0.131	0.158	0.185	0.210	0.236	0.262	0.288	0.316	0.342	0.369	0.396	0.426	0.455	0.488	0.518	0.554	0.592
0.76	0.103	0.130	0.157	0.182	0.208	0.234	0.260	0.288	0.316	0.341	0.368	0.398	0.427	0.460	0.492	0.526	0.563
0.77	0.078	0.105	0.132	0.157	0.183	0.209	0.235	0.263	0.289	0.316	0.343	0.373	0.402	0.435	0.465	0.501	0.539
0.78	0.052	0.079	0.106	0.131	0.157	0.183	0.209	0.237	0.263	0.290	0.317	0.347	0.376	0.409	0.439	0.475	0.513
0.79	0.024	0.051	0.078	0.103	0.129	0.155	0.181	0.209	0.235	0.262	0.289	0.319	0.348	0.381	0.411	0.447	0.485
0.80		0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.157	0.183	0.210	0.238	0.266	0.294	0.326	0.355	0.387	0.421	0.458
0.81			0.026	0.052	0.078	0.104	0.131	0.157	0.180	0.212	0.240	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395	0.432
0.82				0.026	0.052	0.078	0.104	0.131	0.158	0.186	0.213	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369	0.406
0.83					0.026	0.052	0.079	0.105	0.132	0.160	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343	0.380
0.84						0.026	0.053	0.079	0.106	0.134	0.162	0.190	0.220	0.251	0.283	0.317	0.354
0.85							0.026	0.053	0.080	0.107	0.135	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291	0.328

### B、控制及投切类型的选择

型号	控制类型	投切方式	特点
WZ 系列	无功自动补偿	交流接触器	具有功率因数和无功电流两套检测系统，对电网过补偿、欠补偿都能显示并自动作出相应处理，价格低，投切元件体积小，会有拉弧现象，触头使用寿命不够长，为常规选择
WZJ 系列	电能监控及无功自动补偿	交流接触器	具有配变监测、滤波分析等功能，价格较高，投切元件体积小，会有拉弧现象，触头使用寿命不够长
		可控硅	具有配变监测、滤波分析等功能，价格较高，投切元件能过零投切，响应迅速，体积较大，发热量较大，需强迫风冷
		复合开关	具有配变监测、滤波分析等功能，价格较高，投切元件能过零投切，响应迅速，开关接通后无功耗，热性能好