终端无功补偿与自适应电容调节技术

毛书凡

（天津理工大学 工程训练中心，天津 300384）

摘要：通过阐述自适应电容调节技术暨控制电容器充放电电压原理，提出了对终端负载功率因数的自动补偿新方法。利用自关断器件的可关断性，将反向并联二极管的两只自关断器件组成的开关电路，通过逻辑驱动电路、脉宽调制电路、零点检测电路和功率因数检测电路，控制开关电路内自关断器件的通断，以控制补偿电容器的充放电电压的高低，进而控制了电容器补偿电流的大小，等效实现了可调节电容器的功能，并对负载的功率因数补偿进行自动控制。对电路的原理、工作过程和主要器件参数的选择，通过实验检测数据进行了分析和阐述。用该方法制造的自关断器件功率因数自动补偿控制装置，实现了无电容器组投切，而且具有结构简单、体积小、效率高等特点，对可变负载用电设备进行现场随机功率因数补偿。

关键词：电容器；自动补偿；自关断器件；零点开关

中图分类号：TM28 **文献标识码**：A **DOI**：10.19457/j.1001-2095.dqcd22699

Terminal Reactive Power Compensation and Adaptive Capacitance Adjustment Technology

MAO Shufan

（*Engineering Training Center*，*Tianjin University of Technology*，*Tianjin* 300384，*China*）

Abstract: An automatic compensation method was presented based on adaptive capacitance regulation technology and the principle of controlling capacitor charging and discharging voltage. Based on the turn off ability of the self-turn off device，a switch circuit composed of two self-turning off devices connected in reverse parallel with diodes was connected in reverse parallel. Through the logic drive circuit，pulse width modulation circuit，zero point detection circuit and power factor detection circuit，the on-off of the self-turning off device in the switch circuit was controlled to control the charging and discharging voltage of the compensation capacitor，and then the capacitor compensation current was controlled. It was equivalent to realize the function of the adjustable capacitor，and the power factor compensation of the load was automatically controlled. The principle of the circuit，the working process，and the selection of the main device parameters were analyzed and elaborated though experimental data. The power factor automatic compensation control device of the self-turning off device manufactured by this method has the characteristics of simple structure，small volume and high efficiency，and can automatically carry out random power factor compensation for the electric load on site.

Key words: capacitor；automatic compensation；self-turn off device；zero switch

利用电容器对交流电进行功率因数补偿，是目前普遍采用的节电和提高电能利用率有效的现场（随机）补偿技术手段，也是目前最行之有效的补偿方法[1-2]。而现场随机补偿往往要求设备体积小、效率高，并且可自动控制补偿的功率因数[3]。现有报道功率因数自动补偿设备所采用的方案，总体上可分为两类：静止无功补偿装置（static var compensator，SVC）和静止无功发生器（static var generator，SVG）。其中，SVC由于采用控制晶闸管的导通角控制饱和电抗的电流方法，调整补偿无功功率，因此存在饱和电抗器体积大、晶闸管开关损耗大，满足不了现场随机补偿要求[4-5]；虽然SVG与SVC相比，无需饱和电抗，效率有所提高，但是制成的补偿设备电抗体积大、自关断器件开关损耗大，也不易制成现场随机补偿设备[6-7]。

本文提出基于自适应电容调节技术，利用含有自关断器件的功率因数补偿控制电路，通过逻辑驱动电路、脉宽调制电路、零点检测电路和功率因数

基金项目：天津市高等学校国家级大学生创新创业训练计划项目（201410060012）

作者简介：毛书凡（1963—），男，本科，副教授，Email：maoshufan@126.com

检测电路,分别控制电容充放电回路中的两只自关断器件在交流电压波形零点时的关断和导通,以控制电容器充放电电压的高低,实现调节电容器补偿电流的大小;而对用于补偿设备功率因数的电容器容量,也可以进行自动调整,提高用电效率。可以认为该电路是利用可调节的等效电容器暨自适应电容调节技术,实现对可变负载功率因数的自适应补偿电路。该电路不但可以克服现有SVC和SVG损耗大的缺点,而且因为只是采用了有足够裕量的单只补偿电容器,线性调节出低于标定值的所需电容量,免去不同容量的电容器组,既实现了无触点、无投切、体积小、效率高等优点,又易于对功率因数补偿进行自动控制,进而满足可变负载设备高效节电、现场自适应补偿的迫切需求。

1　技术原理

该补偿电路的基本原理如图1所示,50 Hz市电由输入端A和B接入用电负载F_Z的电源,由于用电设备F_Z是感性负载,图1中电抗器L_1的阻抗与电容器C的容抗相比为1%,可忽略不计。D_1和D_2为二极管,自关断器件T_1和T_2等效为开关。图2是图1的等效电路图,图2将F_Z等效为电阻R_L和电感串联后与补偿电容器C相并联。

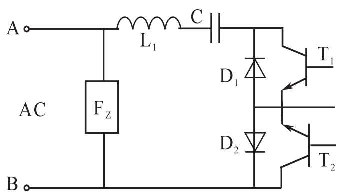

图1　补偿电路的基本原理

Fig.1　Basic principle of compensation circuit

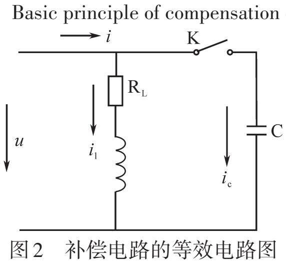

图2　补偿电路的等效电路图

Fig.2　Equivalent circuit diagram of compensation circuit

1.1　电容器与交流电路

电容器存储的能量如下[8]:

$$W = \int_0^t ui\,\mathrm{d}t = \int_0^t Cu\,\mathrm{d}u = \frac{1}{2}Cu^2 \tag{1}$$

从式(1)可以看出,电容器存储的能量与加在两端的电压的平方成正比,改变电容器的端电压即可改变电容器存储的能量。

由于在交流电路中,电容器工作时充电电流等于放电电流,则平均功率等于零,具体如下式:

$$P = \frac{1}{t}\int_0^t p\mathrm{d}t = \frac{1}{t}\int_0^t -\frac{U^2}{2C}\sin(2\omega t)\mathrm{d}t = 0 \tag{2}$$

式中:p为有功功率瞬时值。

1.2　非正弦波无功功率与有功功率

定义含有非正弦波的交流电路中,有功功率P、视在功率S和无功功率Q的关系为

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{3}$$

由于电容器在充放电过程中的电压波形,只有在开关导通时,充电电压波形为局部边界和放电的边界正弦波,而中部是非正弦波,由此可知电容器补偿的无功功率为

$$Q = UI\sin\varphi \tag{4}$$

式中:U,I分别为视在功率的电压、电流。

从式(4)可以看出,当φ为90°时,sin90°值为1,则Q达到最大值,$Q=UI$,这与该电路开关控制充电电压在π/2时补偿最大的情况相吻合。在实际电路中,一方面考虑线损,另一方面还要考虑补偿余量,所以Q取1.2UI即可。视在功率S是不遵守能量守恒定律的,且S只是占有;P在实际上遵循了能量守恒定律的应用。

1.3　时域控制充放电电压控制无功补偿

图2中,电流关系如下:

$$\begin{cases} i\sin\varphi = i_c - i_1\sin\varphi \\ i\cos\varphi = i_1\cos\varphi \end{cases} \tag{5}$$

由式(5)可以看出,在交流电周期式的工作中,实现自关断器件T_1和T_2对电容器C的充放电电压高低控制,即可控制交流电负载功率因数补偿的电流大小,即图2中i_c。

电容器充放电的功率如下式:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\mathrm{d}t = \frac{1}{T}\int_0^T -\frac{U^2}{2C}\sin(2\omega t)\mathrm{d}t = 0 \tag{6}$$

式中:T为交流电源正弦波的周期。

在交流电周期式的工作中,如实现了自关断器件对电容器的充放电,既控制电压U,又控制了电容器充放电电流大小。改变了式(6)中$\omega = 2\pi f\varphi$的φ角度,改变了充放电电压U,所以改变了瞬时有功功率,进而达到对交流电负载的功率因数自动补偿的目的,此时有功功率P如下:

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2}\int_0^{2\pi} ui\,\mathrm{d}(\omega t) \\ &= \frac{1}{2}\int_0^{2\pi} UI\cos\varphi - UI\cos\varphi\cos(2\omega t)\mathrm{d}(\omega t) - \\ &\quad \frac{1}{2}\int_0^{2\pi} -UI\sin(\omega t)\sin(2\omega t)\mathrm{d}(\omega t) \\ &= UI\cos(\omega t) \end{aligned} \tag{7}$$

2 技术及方法实现

通过驱动电路控制的自关断器件,组成如图3所示的开关电路对电容器C的充电和放电过程进行控制。

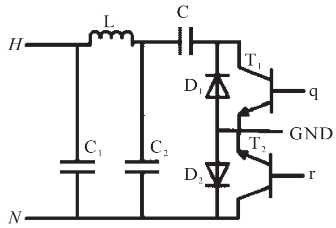

图3 控制充放电的开关电路

Fig.3 Switch circuit of controlling charge and discharge

图4为电容器两端充放电电压波形,图中黑色面积的部分为充电电压波形。交流电AC经限流电感L加至补偿用电容器C,T_1,T_2和两只二极管D_1,D_2。在交流电压的正半周期内,由驱动电路驱动T_1的q端以零点为起点,在$(0,\pi/2)$区间内经二极管D_2对电容器进行时间可调式充电控制;在$(\pi/2,\pi)$区间内驱动T_2的r端经二极管D_1对电容器进行放电控制;在交流电压的负半周期内,以π点为起点在$(\pi,3\pi/2)$驱动T_2的r端经二极管D_1对电容器进行时间可调式充电控制;在$(3\pi/2,2\pi)$区间内T_1经二极管D_2对电容器进行放电控制,从而在交流电周期性工作中实现了电容器充电。

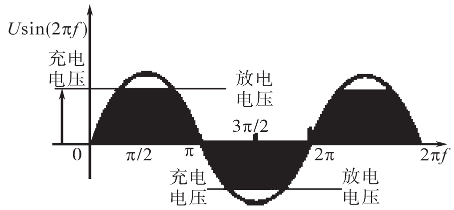

图4 电容器两端充放电电压波形

Fig.4 Voltage waveform of charge and discharge at both ends of capacitor

3 技术应用

3.1 实例

图5是使用上述原理设计的一种自关断器件电容器功率因数补偿控制装置的电路原理框图。

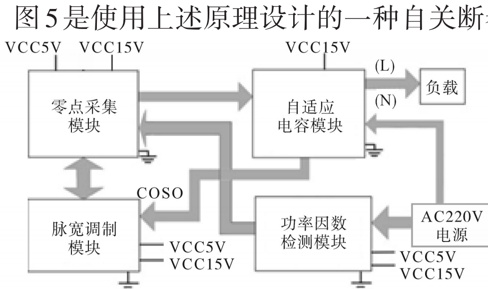

图5 电路原理框图

Fig.5 Circuit principle block diagram

在自适应电容模块中,电流经滤波电路内的电容器C_1、电感L和电容器C_2滤波后,由电容器C经开关电路构成主电路[9],见图3。工作时,功率因数检测模块内的电流互感器将检测出的电流波形传给相位比较器与变压器检测到的电压波形进行相位比较后,以电压形式传给脉宽调制模块,其波形如图6中所示。

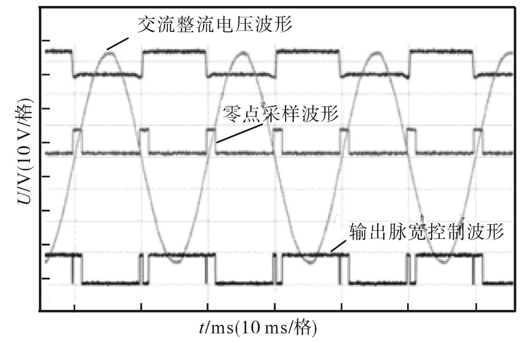

图6 交流整流电压波形、零点采样波形和输出脉宽控制波形

Fig.6 AC rectifier voltage waveform, zero sampling waveform and output pulse width control waveform

同时,零点检测模块依据功率因数检测模块检测到的电压波形向脉宽调制模块传送零点同步脉冲电压;脉宽调制模块再根据接收到的零点同步脉冲电压,调制输出相应脉宽控制电压波形,该波形为交流负半波的逻辑驱动输出波形。输出脉宽宽度以适应在交流电正、负半周分别以零点和π点为起点在$0\sim\pi/2$和$\pi\sim3\pi/2$内周期性变化。

交流电压周期性变化。在交流电的正半周由开关电路自关断器件T_1的控制端,控制T_1导通,经二极管D_2对电容器C进行充电控制;在交流电的负半周由开关电路自关断器件T_2的控制端,控制T_2导通,经二极管D_1对电容器C进行充电控制。零点检测模块将功率因数检测模块内的正半周方波驱动自关断器件T_2的控制端,控制T_2导通,经二极管D_1对电容器C进行放电控制;负半周期方波输出自关断器件T_1的控制端,控制T_1导通,经二极管D_2对电容器C进行放电控制。

该电路在交流电周期性的工作中实现了在自关断器件以端电压零点开始对电容器充电和至零点电流放电。

3.2 主要器件参数的选择

由于采用交流电压在零点电位时开通,其限流电抗器在电路中可大幅减小限流电感值。由于选择了自关断器件的开通管压降与二极管压

降电压之和,作为并联在220 V交流电压的补偿电容短路压降的电抗率计算值,其结果为:n=2/220≈0.009,可等效为0.01计算,远远低于现有设计标准0.04~0.16,达到了减小限流电感体积要求。

由于自关断器件T_1和T_2在整个充放电过程中设计为零点开通和关断,自关断器件只有在1/4时间处于开关损耗状态,所以散热量较大的问题也得以解决。

4 实验结果

经4台220 V,2 A样机和1台三相380 V,10 A样机实验结果表明,用该方法制作成的自关断器件功率因数补偿控制装置不但损耗少、体积小,可自动控制功率因数在0.97~0.98,并且还具有噪音小的特点,完全能够胜任现场随机补偿的要求,且电压波形无明显畸变,无电压升高现象。

尤其是采用三个单相交流功率因数自动补偿控制电路所组合成的三相交流功率因数自动补偿控制装置,可分别对三相电压中的任一项负载单独进行功率因数补偿,达到了三相电压电能质量的相对平衡。经过上述样机的运行,证明了利用自适应电容技术实现功率因数就地自动补偿方法的可行性。

对自关断器件导通在自适应电容充放电回路的线性调节曲线的实验测试结果如图7所示。

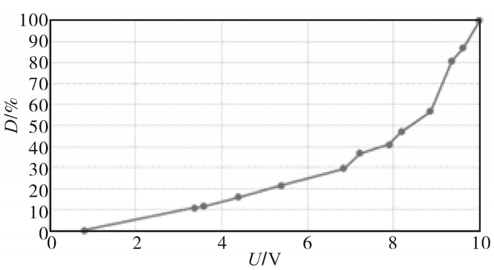

图7 实验测试结果曲线图

Fig.7 Graph of experimental test results

曲线对功率因数检测反馈电压与自关断器件栅极导通时间所对应的占空比及线性调节关系如表1所示。

表1 线性调节关系

Tab.1 Linear regulatory relationship

电压/V	10	9.62	9.36	8.86	8.18	7.9	7.22
占空比/%	100	87	80.75	56.75	47	40.75	36.75
电压/V	6.84	5.4	4.4	3.58	3.36	0.8	
占空比/%	29.4	21.3	15.75	11.25	10.75	0	

自关断器件导通的控制电压,同样在闭环系统中也是作为功率因数检测的反馈控制电压,对应功率因数的线性关系如图8所示。

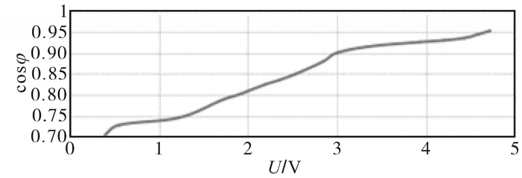

图8 线性关系

Fig.8 Graph of linear relation

随着功率因数的线性增长,当以24 W电机作为负载时,且交流电压保持在220 V的条件下,选择的补偿电容为12 μF/400 V,对应的电流线性下降的实验数据如图9所示。

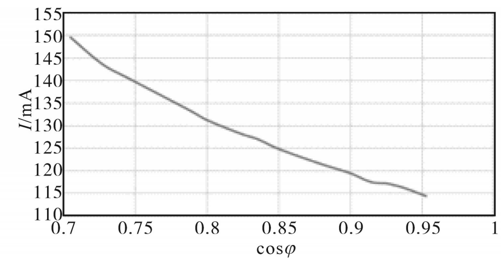

图9 实验数据线形图

Fig.9 Linear graph of experimental data

测试感性负载的电流下降平均值为22%,实验结果对无功功率的抑制作用和节电效果明显,详细实验参数如表2所示。

表2 实验参数

Tab.2 Experimental parameters

功率因数	电流/mA	功率/W	电压/V
0.953	114.3	24.01	4.72
0.944	115.4	23.98	4.58
0.936	116.3	24.02	4.44
0.93	116.8	23.92	4.20
0.926	117.1	24.02	3.93
0.915	117.4	23.82	3.35
0.9	119.4	23.75	3.00
0.88	121.4	23.72	2.85
0.85	124.8	23.59	2.54
0.835	127.0	23.49	2.35
0.825	128.0	23.41	2.20
0.8	131.2	23.39	1.89
0.79	133.0	23.25	1.74
0.745	140.5	23.17	1.22
0.728	143.4	23.14	0.56
0.705	149.5	23.09	0.40

另制作的一台三相380 V,10 A自关断器件功率因数自动补偿装置,对5 kW某品牌三相空调进行现场随机补偿,每相补偿电容均为22 μF/400 V,得到的实际数据如表3所示。

表3 实际数据表

Tab.3 Actual data sheet

	工作电压/V	工作电流/A	功率因数
补偿前	386	9	0.6
补偿后	386	6.5	0.985

补偿前输入电流在8.7~9 A间动态变化,补偿后电流在6.2~6.5 A间变化。补偿电流在2.2~2.5 A间动态变化而补偿前后电压无变化;并且未发现高次谐波;补偿装置无噪声;电网的提高利用率在27%~29%;节电率为5%~7%。

5 结论

本文介绍了一种通过控制电容器自身充放电电压对交流用电设备进行功率因数自动补偿的方法,在理论上论证了该方法的可行性,并通过利用自关断器件的自关断特性,组成开关电路,进行了自适应电容技术对功率因数补偿控制电路的测试数据分析。用该电路制成自关断器件电容器功率因数补偿控制装置的实例,验证了该方法原理制成的电路和装置,通过采用零电流充放电电路降低了开关损耗,缩小了限流电抗的体积进而提高了工作效率。该方法具有损耗小、效率高、体积小、结构简单、成本低、使用和维修方便等优点,为电容器功率因数补偿方法提供了新的方案。

参考文献

[1] 李晓军,孙翠平,李明.宏异步电动机无功就地补偿的有关计算[J]. 电力电容器与无功补偿,2011,32(3):10-13.
Li Xiaojun, Sun Cuiping, Li Ming. Related calculations of the reactive power local compensation on asynchronous motor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2011,32(3):10-13.

[2] 马昭祥.油田配电网无功优化补偿的研究[J]. 东北电力技术,2010,31(4):22-24.
Ma Zhaoxiang. Research on reactive optimal compensation for distribution network in oil field[J]. Northeast Electric Power Technology,2010,31(4):22-24.

[3] 粟时平,刘桂英.静止无功功率补偿技术[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
Su Shiping, Liu Guiying. Static reactive power compensation technology[M]. Beijing:China Electric Power Press,2006.

[4] 刘希霞.SVC静止型动态无功补偿系统的应用[J]. 硅谷,2012(2):126.
Liu Xixia. Application of SVC static dynamic reactive power compensation system[J]. Silicon Valley,2012(2):126.

[5] 杨程,李旷,张海涛.±200 MVA链式静止补偿器STATCOM的主电路联接型式分析[J]. 电气技术,2011(12):46-49.
Yang Cheng, Li Kuang, Zhang Haitao. The main circuit's connection mode of ±200 MVA chained STATCOM[J]. Electrical Engineering,2011(12):46-49.

[6] 胡明,杜艳,干玲.SVG在徐矿集团6 kV供电系统谐波治理中的应用[J]. 煤矿机械,2011,32(10):237-239.
Hu Ming, Du Yan, Gan Ling. Xukuang group 6 kV power system harmonic elimination based on SVG[J]. Coal Mine Machinery,2011,32(10):237-239.

[7] 黄妤群.SVG无功补偿技术在低压配电网中的应用[J]. 机电信息,2011(12):44-45.
Huang Yuqun. Application of SVG reactive power compensation technology in low voltage distribution network[J]. Mechanical and Electrical Information,2011(12):44-45.

[8] 苑舜,韩水.配电网无功优化及无功补偿装置[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
Yuan Shun, Han Shui. Reactive power optimization and reactive power compensation device of distribution network[M].Beijing:China Electric Power Press,2003.

[9] 李香龙.自关断器件功率因数补偿控制电路:中国,CN201110390977.5[P]. 2014-06-18.
Li Xianglong. Power factor compensation control circuit of self turn off device:China,CN201110390977.5[P]. 2014-06-18.

收稿日期:2020-11-19
修改稿日期:2020-12-22

(上接第14页)

2015:1609-1614.

[6] Tang Q, Chen D, He X. Integration of improved flux linkage observer and *I-f* starting method for wide-speed-range sensorless SPMSM drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020,35(8):8374-8383.

[7] 尹泉,张馨月,罗慧,等.PMSM抑制*I/f*启动策略稳态速度波动的新型方法[J]. 电气传动,2020,50(6):3-9.
Yin Quan, Zhang Xinyue, Luo Hui, *et al*. A new method to reduce steady state velocity fluctuation of the *I/f* starting strategy for permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Drive, 2020,50(6):3-9.

[8] Sakamoto K, Iwaji Y, Endo T, *et al*. Position and speed sensorless control for PMSM drive using direct position error estimation[C]//IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Denver:IEEE,2001,3:1680-1685 .

[9] 赵佳怡,徐政,李光明,等.PMSM转子初始位置分相注入检测法[J]. 电气传动,2020,50(11):3-6.
Zhao Jiayi, Xu Zheng, Li Guangming, *et al*. Individual phase injection detection method of PMSM rotor initial position[J]. Electric Drive,2020,50(11):3-6.

收稿日期:2021-01-06
修改稿日期:2021-02-22