

纯电容补偿面临的谐波影响及其解决方法

田 园

(南充电业局检修公司,四川南充 637007)

摘要:目前通过在负荷端并联电容器的无功补偿,基本能满足低压配电系统的无功需求。但由于谐波的存在,无功补偿的电容可能导致谐波电流变大,补偿设备容易被过多的谐波电流损坏。谐波可以通过安装具有适当电抗率的反应器得到有效抑制,由电容影响扩大的谐波电流也将被减小,补偿电路就能保证正常工作。同时,部分谐波可以通过滤波器,使谐波含量在正常范围内,确保设备的正常运行。

关键词:补偿;谐波;电容电抗器

Abstract: The current reactive power compensation can basically meet reactive demand in low-voltage distribution system by shunting capacitors at the load side. However, because of a certain amount of harmonics in distribution system, the reactive compensation using pure capacitance could cause the enlargement of harmonic current, the compensation devices are damaged by excessive harmonic current. Harmonics can be effectively suppressed by mounting reactors with suitable reactance rate, and the amplification of harmonic current caused by capacitor will be decreased, so the normal operation of compensation circuit is ensured. Meanwhile, the partial harmonics can be filtered by active filters and passive ones to make harmonic content within normal limits so as to guarantee the normal operation of devices.

Key words: compensation; harmonics; capacitor reactor

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0006-05

0 引言

在低压配电系统中的阻感性用电设备得到广泛的应用,造成电网的功率因数偏低,给用电设备以及电网造成比较大的危害。无功补偿成为现在低压配电系统中不可缺少的部分,常用方式是在电力负荷侧并联电力电容器。这种补偿方式可以提高供电系统功率因数,稳定受电端电压水平,从而提高电网供电质量。但采用纯电容器进行无功补偿时会有大量谐波产生的情况,电容器的补偿支路经常容易故障,造成电容器、投切开关与保护设备损坏。

1 低压配电系统中谐波的产生

工业中常用的各种相控装置、直流电机包含的整流设备,为了实现异步电动机的平缓启动、调速与节能而广泛使用的变频器、低压中频炉、逆变器、荧光灯甚至计算机电源等大量的非线性设备的使用,使得现在的低压配电系统中存在着大量的谐波,这对无功补

偿所用的电容、电感等器件造成了极大影响。

2 纯电容器补偿面临的问题

2.1 低压配电系统中电容器容易出现的问题

并联于电网运行的电容器是配电系统中最容易损坏的元件,一般选用400V的额定电压。而实际运行的低压母线,电压一般会超过电容器额定电压的3%,同时低压母线上常会产生的过电压、过电流,常会造成电容器触点烧结、电容器膜被击穿、电容器鼓包等情况^[1]。

低压负荷中的非线性设备产生大量谐波,经实测发现谐波电压含量一般能达到国家的标准,影响不大,但谐波电流的影响却不容忽视^[4]。现场测试到纯电容器补偿支路与系统侧的谐波电流都被放大,放大的谐波电流叠加于电容器的两端,致使补偿支路的电流过大。

所以电网中谐波电流已经成为补偿支路不能正常运行和电容器的使用寿命减少的主要原因。

2.2 电容器对谐波电流的影响

电力系统中的元件大多为系统阻抗呈感性的感性元件,并且在不同的频率下,呈现不同的阻抗性质和数值,影响系统的正常运行。

2.2.1 电容器对谐波电流的放大

电力系统的谐波源主要是可以认为是恒流源的谐波电流源,即输入阻抗变化时其谐波并无多大的变化^[2]。图1是现在低压补偿系统的简化图。

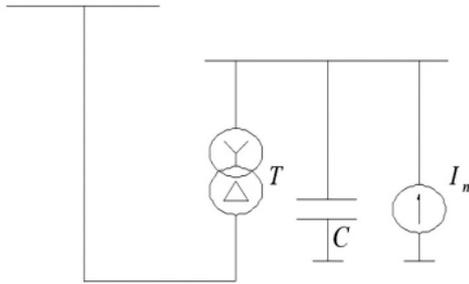


图1 系统简化接线图

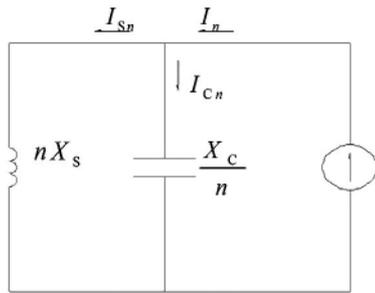


图2 等值电路图

低压母线上并联的补偿电容器,其谐波阻抗为 X_{Cn} 。略去电阻影响,系统的等效电路为图2;谐波源的谐波电流为 I_n ,得到注入系统中的谐波电流 I_{Sn} 与电容器支路的谐波电流 I_{Cn} 分别为

$$I_{Sn} = \frac{-X_C/n}{nX_S - X_C/n} \cdot I_n \quad (1)$$

$$I_{Cn} = \frac{nX_S}{nX_S - X_C/n} \cdot I_n \quad (2)$$

由于基波参数不变,故支路电流为 I_{Cn} 和 I_{Sn} 是频率的函数。令电容器串电抗器支路的谐波阻抗与系统谐波阻抗之比为

$$\alpha = f(n) = \frac{-X_C/n}{nX_S} \quad (3)$$

α 就是谐波次数 n 的函数,并随 n 而变化,系统侧谐波 I_{Sn} 与负载产生谐波 I_n 之比、电容器支路的谐波 I_{Cn} 与设备产生谐波 I_n 之比可分别表述为

$$\frac{I_{Sn}}{I_n} = \frac{\alpha}{1 + \alpha} \quad \frac{I_{Cn}}{I_n} = \frac{1}{1 + \alpha} \quad [3]$$

根据并联纯电容器后的谐波电流放大曲线图可以看出,只要投入纯电容器进行补偿就会发生谐波电流的放大。在 $-0.5 < \alpha < 0$ 时,系统的谐波电流比没有补偿时有所下降;但随着纯电容投入数量增多 α 会减小,情况会更加严重。在 $-1 < \alpha < -0.5$ 时,谐波电流被严重放大,电容侧的谐波电流被放大2倍以上,电容器很容易发生击穿。在 $\alpha = -1$ 的时候发生并联谐振,系统谐波阻抗 X_{Sn} 与电容阻抗 X_{Cn} 相等;在较小的谐波电流作用下也会在并联阻抗的两端产生无限大的谐波电压,电容器支路的电压会远超过其额定电压,很容易造成电容器的膜被击穿,发生鼓包、漏油。

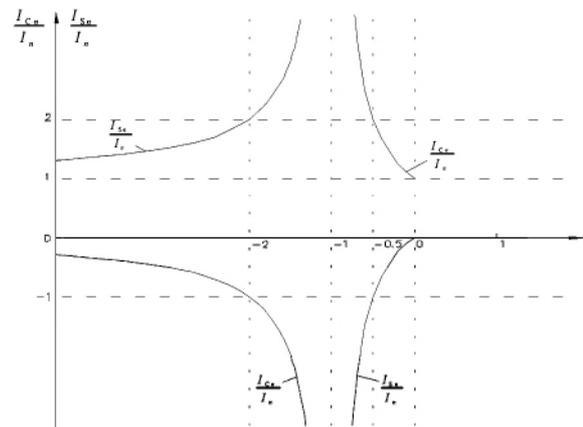


图3 并联纯电容器的谐波电流放大曲线

2.2.2 纯电容在谐波环境下的工作情况

表1是在某厂实测到并联电网的电容器实际的工作情况^[4],该电容器的额定容量为30 kvar,额定电流为43.3 A。电容器侧主要含有5次谐波,同时存在少量的3次谐波。

表1 纯电容器补偿支路的实测情况

名称	L ₁	L ₂	L ₃	合计
单相电压/V	227.8	228.3	227.3	
单相电流/A	50.91	49.41	51.21	
视在功率/kVA	11.6	11.3	11.6	34.5
有功功率/kW	0.4	0.4	0.3	1.1
无功功率/kvar	-11.6	-11.3	-11.6	-34.5
电流总谐波畸变率/%	57.7	54.0	60.1	
电压总谐波畸变率/%	2.8	2.8	3.0	
基波电流/A	43.6	43.0	43.3	
3次谐波电流/A	4.9	5.5	6.0	
5次谐波电流/A	24.5	23.8	25.0	

3 低压配电系统中纯电容器补偿的改进

通过改变用电设备,使用不产生谐波的用电设备;加装无源滤波器或者有源滤波器,滤除部分谐波;改变电容器支路设备,加装电抗器抑制谐波,降低电容器支路的谐波电流等等方法来保证用电设备与补偿支路的正常工作。

3.1 改变用电设备

非线性的用电设备是主要的谐波产生源,在选择用电设备的时候,最好选择容性的或者电阻性的设备,不用进行无功补偿。

但现在想要改变用电设备来减少谐波的含量是不可能实现的。用电设备的前期投入的资金很高,要想再改变是不可能的,而且产生谐波的设备往往是辅助设备,是不能缺少的,因此想通过改变用电设备这种方式来解决纯电容器补偿对谐波电流的放大是不能实现的^[5]。

3.2 补偿支路加装无源滤波器

用电设备产生的谐波已经对电网产生比较严重的影响,通过加装电抗器的电容器支路,虽然能够抑制谐波,但由于谐波的基数过大,造成谐波的抑制效果不明显。此时为了滤除某次谐波就可以利用无源滤波器来解决滤波要求不是很高的工况^[6]。

无源滤波器主要由滤波电容器、滤波电抗器等组成 LCR 滤波装置,针对某次谐波来进行滤除。现在应用上来看,一般无源滤波器只能滤除部分谐波,滤波的效果不是很好。无源滤波器作为吸收谐波的设备,主要分为有单调谐滤波器和高通滤波器两种基本型式。

单调谐滤波器由 L、C、R 元件串联组成,高通滤波器主要产用 L、C、R 元件经串、并联组成。无源滤波需要针对不同次数的谐波做多个的滤波回路,设备的总回路数量很大,设备的体积比较大,并且对电容器与电抗器运行的准确性与承受谐波过电流的要求很高。现在无源滤波器只是在针对某次谐波电流含量过高,并且要求谐波必须滤除的工厂里少量使用。

3.3 补偿回路加装有源滤波器

有源滤波器是一种用于动态滤除谐波、补偿无功的新型电力电子装置,它能对大小和频率都变化的谐波以及变化的无功进行补偿,其应用可克服 LC

滤波器等传统的谐波抑制和无功补偿方法的缺点。

有源滤波器是以时域分析为基础对畸变波实时“跟踪”补偿,检测补偿对象电流中的谐波和无功等电流表分量。检测结果经指令电流运算电路计算出补偿电流的指令信号,该信号经补偿电流发生电路放大,得出补偿电流,补偿电流与负载电流中要补偿的谐波及无功等电流抵消,最终得到期望的电源电流。这样可使任意频率、任意幅值和相位的谐波都能清除,并使无功功率得到完全的补偿^[7]。

有源滤波器要做到完全的波形补偿,就需要很好的信号跟踪系统,同时要做出快速判断,还要性能稳定的电源作为补偿的元件。现有技术还不能进行大范围推广,只在装设对谐波很敏感的精密仪器的工厂少量使用。

3.4 改变电容器支路

通过改变电容器支路的设备是最好的方法,也是最节约成本的方式,可以在电容器支路侧加装串联电抗器来实现谐波的抑制。加装电抗器后必须使电容器支路在高次谐波频率下呈感性,起到抵制谐波电流的效果,基波频率下呈容性,进行无功补偿。

可以通过加装电抗器后的情况进行分析,图4为系统的简化图,可以等效出电网的等值电路为图5。

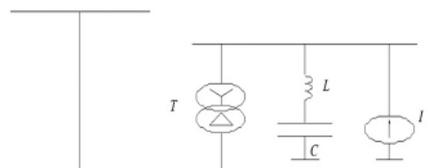


图4 系统简化接线图

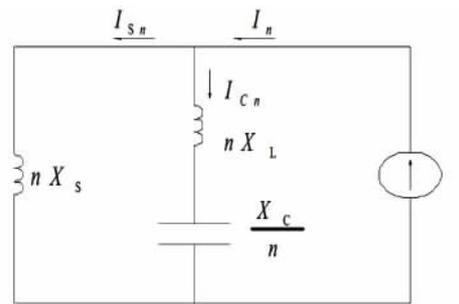


图5 等值电路图

在某次谐波电流的情况下,电容器支路的阻抗值为 $nX_L - X_C/n$ 。

经分析可以得到系统侧谐波电流为

$$I_{sn} = \frac{nX_L - X_C/n}{nX_s + (nX_L - X_C/n)} \cdot I_n \quad (4)$$

电容器支路的谐波电流为

$$I_{Cn} = \frac{nX_L - X_C/n}{nX_S + (nX_L - X_C/n)} \cdot I_n \quad (5)$$

由于基波参数不变,故支路电流 I_{Cn} 和 I_{Sn} 是频率的函数。令电容器串电抗器支路的谐波电抗与系统谐波电抗之比为

$$\alpha = f(n) = \frac{nX_L - X_C/n}{nX_S} \quad (6)$$

在系统情况给定时, X_S 、 X_L 和 X_C 的值给定, α 就是谐波次数 n 的函数,并随 n 而变化,得出系统侧谐波电流 I_{Sn} 与谐波源的谐波电流 I_n 之比、电容器支路的谐波电流 I_{Cn} 与谐波源的谐波电流 I_n 之比分别为

$$\frac{I_{Sn}}{I_n} = \frac{\alpha}{1 + \alpha} \quad \frac{I_{Cn}}{I_n} = \frac{1}{1 + \alpha}$$

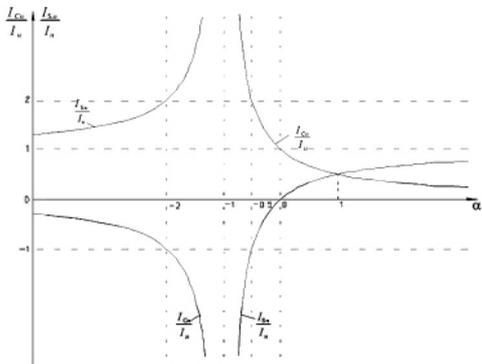


图6 谐波电流放大曲线

图6为加装电抗器后的谐波电流的放大曲线图形,可以看出在电容器串联电抗器后的系统谐波电流、电容器支路谐波电流对谐波源的谐波电流的关系^[8]。在 $-0.5 < \alpha < 0$ 时,电容器侧为容性,谐波电流被放大为 n 次谐波电流的2倍以下,可以实现滤波的作用。此时有较高的谐波电流,设备容易击穿。

在 $\alpha = 0$ 时,在 n 次谐波阻抗为零,构成 n 次谐波电流的通道,可以完全滤除谐波。在 $0 < \alpha < 1$ 时,电容器支路呈感性,系统谐波电流 I_{Sn} 与电容器侧谐波电流 I_{Cn} 都大于0,有效保护电容器。当出现 $\alpha > 1$ 时,电容器侧谐波电流 $I_{Cn} >$ 系统谐波电流 I_{Sn} ,大部分谐波电流倒送电网,会对电网产生不良影响。少量的谐波电流进入电容器支路,保证进行无功补偿。串联电抗器进行谐波抑制必须要求达到 $\alpha > 0$,才不会发生谐波电流放大。

3.4.1 选择合适的电抗率

选择合适的电抗率是谐波抑制的关键问题,由于电抗率是电抗器的感抗与电容器的容抗的比值,

$A = X_L - X_C$ 。电容器支路的谐波电流为

$$I_{Cn} = \frac{nX_L - X_C/n}{nX_S + (nX_L - X_C/n)} \cdot I_n = \frac{(An^2 - 1)X_C}{nX_S + (An^2 - 1)X_C} \cdot I_n \quad (7)$$

要求 I_{Cn} 必须大于0才能保证谐波电流不会被放大,电容器支路的谐波电流、系统侧谐波电流都小于谐波源的谐波电流。

针对3次谐波时, $A > 11.11$,一般选用12%的电抗率,同时在5、7次谐波时电容器支路的谐波电流较小,工况特殊的时候(3次谐波电流含量超过50%)建议使用13%、14.8%的电抗率。

针对5、7次谐波时 $A > 4$,一般选用4.5%的电抗率,同时在7次谐波时电容器支路的谐波电流较小,在抑制5、7次谐波时采用6%及以上的电抗率。实际设计中为保护电容器运行时,都建议采用7%的电抗率,减少流入电容器的谐波电流的比例^[9]。

加装串联电抗器是最简单易行的方式,并且投资资金比较少,但这种方式只能让电容器支路与系统分流谐波电流。实际设计时为保护电容器支路的正常运行,往往通过加大电抗率来提高电容器支路的谐波阻抗,保证电容器支路承受少量的谐波电流,总电流在其额定电流以下,同时让多数的谐波电流反馈电网。

3.4.2 电容器电压的选择

在串有电抗器的电容器支路,电抗器呈感性,电容器呈容性,电容器两端的电压为 $U_C = U_S + U_L$,同时 $A = X_L/X_C$,即 $U_C = U_S/(1 - A)$ 。电容器在加装电抗器后会升压,电容器的额定电压要根据电抗率与母线电压进行选择。

表2 加装13%电抗器的补偿支路的实测情况

名称	L ₁	L ₂	L ₃	合计
单相电压/V	234.5	234.8	236.1	
单相电流/A	118.0	116.4	117.4	
视在功率/kVA	27.7	27.3	27.7	82.7
有功功率/kW	0.8	1.3	1.2	3.4
无功功率/kvar	-27.7	-27.3	-27.7	-82.7
电压总谐波畸变率/%	2.5	2.4	2.2	
电流总谐波畸变率/%	4.1	3.8	3.9	
基波电流/A	117.9	116.3	117.3	
3次谐波电流/A	1.4	1.1	0.8	
5次谐波电流/A	4.5	4.2	4.4	

表3 加装电抗器的系统侧补偿前后的实测情况

名称	补偿前系统侧的情况				补偿后系统侧的情况			
	L ₁	L ₂	L ₃	合计	L ₁	L ₂	L ₃	合计
电压/V	231	232	233		237	238	239	
电流/A	584	554	542		350	337	346	
视在功率/kVA	135	129	127		82.8	80	82.7	246
有功/kW	71.3	64	63.0		77.8	74	77.6	230
无功/kvar	114	112	110	336	28.4	30	28.4	86.8
电压总谐波畸变率/%	2.7	2.8	2.5		2.3	2.4	2.1	
电流总谐波畸变率/%	12.0	13	13.7		18.1	20	19.3	
基波电流/A	580	549	536		345	330	340	
3次谐波电流/A	7.9	8.5	8.2		4.5	4.6	3.9	
5次谐波电流/A	66.0	70	69.5		58.8	63	61.8	

在针对3次谐波,采用12%的电抗率时,并联与电压为400V的母线上时,电容器两端的电压为454.6V,则必须选择电容器的额定电压为480V或500V。针对5、7次谐波,采用7%的电抗率时,并联于电压为400V的母线上时,电容器两端的电压为430.1V,则最低选择电容器的额定电压为450V。

3.4.3 电容器的容量的选择

现在选择补偿总容量主要根据设备的有功功率与功率因数来计算单个设备所需要的无功容量,再使用利用率相乘,得到无功补偿的总容量,这样的计算结果有比较高的精度。

选择电容器分组时,现在主要采用等容量的方式,一般采用8~10组比较好,每次投入的时候可以投入较小的容量,产生较小的涌流,电容器分组可以根据现在情况合理地选择。

3.4.4 电容器支路开关的选择

电容器补偿柜的一次回路的控制开关主要有切换电容接触器、智能复合开关、可控硅开关等。可控硅开关是未来发展的一个方向,其投入时没有涌流,切除时涌流较小,动作速度快的特点已经得到重视^[11]。

开关设备的额定电流可以根据电容器的额定参数进行选择,在电网含有谐波的时候可以按电容器额定参数的1.5~2.0来选择设备。

3.5 采用加装电抗器的改造实例

表2是对改造后电容器补偿支路的测试情况^[4],表3是在系统的低压母线处测试情况,两次测试分别是没有无功补偿与电容器串联电抗率为

13%的电抗器后的情况。

经过项目改造前后实测的补偿支路的电能质量的分析,可以看出加装电抗器后补偿支路的电流谐波的畸变率由60%下降到4%,5次谐波电流有明显的下降,同时总电流下降到允许的范围,谐波电流抑制效果非常明显。

根据系统的低压母线处测试补偿前后的情况,系统的谐波电流以5次谐波为主,含有部分的3次谐波。此时无功功率得到补偿,变压器的利用率得到提高。无功补偿后总电流下降近40%,谐波总电流的下降近15%。

4 结 语

无功功率补偿、谐波治理是当前乃至今后相当长的时期内的低压配电系统面临的重要问题。如今纯电容器的补偿柜在谐波含有量很少的工业和民用得到广泛的应用。面对大量产生谐波的用电设备,低压配电系统已经对电容器补偿支路提出了更高的要求,抑制谐波、滤除谐波的时代已经来临。补偿支路加装电抗器进行谐波抵制是当前最经济而实用的方法,选择合适的电抗率还是有很大的困难,必须经过现场的测试与设备的分析来选择。现在串联电抗器进行谐波抑制还是首选方案,基于电力电子技术的有源滤波器应用将会对未来建设干净电网发挥重要的作用。

(下转第47页)

电网损耗,变压器档位和电容器的调节量较大,AVC系统省时省力省资源的优势明显。

目前成都电网AVC系统已与省调AVC主站系统的通讯、控制策略和优化模式联调成功。省调主站实时下发220 kV变电站母线电压参考值和关口力率,地调AVC主站系统接收后,作为优化计算的约束条件,进而得到优化控制策略,最后根据优化控制策略结果调控220 kV变电站。

7 结 语

对成都电网自动电压控制AVC系统的建设、实现和运行情况进行了介绍。成都电网AVC系统将完善地调AVC系统和县调AVC系统的协调控制。自从成都电网区域闭环控制稳定后,全网在电能质量、功率因素都有全面提高,增加了无功补偿设备的利用率,实现无功功率分层就地平衡,对降低系统网损,减小运行人员工作强度起到重要作用。今后可以进一步优化地调AVC系统,完善省、地、县调AVC系统的联合协调闭环控制,使无功电压控制方式更趋合理高效。

参考文献

- [1] 余涛,周斌. 电力系统无功/电压控制策略研究综述[J]. 继电器, 2008, 36(6): 79-83.
 - [2] 郭庆来,吴越,等. 地区电网无功优化实时控制系统的研究与开发[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(13): 67-69.
 - [3] 李端超,陈实,等. 安徽电网自动电压控制(AVC)系统设计及实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 20-22.
 - [4] 郭庆来,孙宏斌,张伯明,等. 江苏电网AVC主站系统的研究和实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 83-87.
 - [5] 唐寅生,李碧君. 电力系统OPF全网最优无功的经济压差算法及应用[J]. 中国电力, 2000, 33(9): 42-44.
- 作者简介:
刘建(1984),男,助理工程师,主要从事电力调控运行工作;
胡启元(1972),男,工程师,主要从事电力调控运行及相关研究工作。

(收稿日期:2012-12-03)

(上接第10页)

参考文献

- [1] 宋文南. 电力系统谐波分析[M]. 天津:中国电力出版社,1998.
- [2] 孙成宝,李广泽. 配电网实用技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,1998.
- [3] 吴兑昌,孙树勤,宋文南,等. 电力系统谐波[M]. 北京:水利电力出版社,1988.
- [4] 李冰,淳森林. 现场测试报告[R]. 成都胜业电器设备有限公司,2009.
- [5] 于永源,杨绮雯. 电力系统分析[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [6] 姚为正. 三相串联型电力滤波控制方式及其补偿特征的研究[M]. 西安:交通大学,1999.
- [7] 周训伟. 串联有源电力滤波器研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
- [8] 苏文成. 无功功率补偿与电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [9] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [10] T. J. E 米勒主编. 电力系统无功功率控制[M]. 北京:

水利电力出版社,1990.

- [11] 航空工业部第四规划设计研究等编. 工厂配电设计手册[S]. 北京:水利电力出版社,1985.
- [12] 汪穗峰,张勇军,任倩,等. 配电网可靠性定量分析综述[J]. 继电器, 2008, 36(3): 79-83.
- [13] 刘进军,卓放. 电容滤波型整流电路网侧谐波分析[J]. 电力电子技术, 1995(4): 14-19.
- [14] GB/T 14549-93, 电能质量 公用电网谐波[S]. 北京:中国标准出版社,1994.
- [15] 王汝文,张杭. 电力电子技术应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,1998.
- [16] Dobinson A D. Closer Accord on Harmonics[J]. IEEE Electron Power, 1997(5): 567.
- [17] Sakui M, Fujita H, Shioya M. A Method for Calculating Harmonic Currents of Three-Phase Bridge Uncontrolled Rectifier with DC Filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1989, 36(3): 434-440.

作者简介:

田园(1979),男,工程师,主要从事电力系统规划、设计和施工。

(收稿日期:2013-02-04)