

三电平四桥臂低压SVG控制与应用研究

分析了三相三电平四桥臂逆变器的结构及优越性能,并将其作为三相SVG的主电路结构用以实现由于负载不平衡引起的三相四线制中性线电流的补偿。分析了其工作原理及数学模型,提出了基于载波层叠PWM方法的控制策略,实现对不平衡负载系统有效的无功补偿及中性线电流的控制,简化了传统三电平逆变器结构的控制方法;针对二极管钳位型三电平逆变器固有结构造成的直流侧电容电压中性点电位不平衡问题,分析了其不平衡原理,采用直流电压双环控制进行了电容电压稳定及均压控制,有效地平衡了直流侧电容电压。仿真结果验证了所提出的三电平四桥臂结构在提高输出波形质量和降低损耗方面的优良性能。

王 磊 毛 戈 史朝晖/山东电力工程咨询院有限公司
孙立军/山东大学电气工程学院

随着电力电子器件及非线性设备的大量使用,电网电能质量受到很大的影响,电网中由于负载种类增多、容性和感性负载增加,使电网电压和电流之间产生相位差,因而产生了无功功率,无功功率的存在使线路容量和电流增大、运行效率下降、成本增加以及线路电压损失较大等,因此,无功补偿问题日益重要。

目前,三相三线制系统中广泛应用的无功补偿装置主要是两电平三桥臂结构的电压型SVG,由于没有中性线,因此其主要控制策略是对负序电流的补偿。但随着应用广泛的三相四线制中大量非线性及不平衡负载的增加,中性线上积累了大量的零序电流,对系统造成了很大的安全隐患,但传统的三桥臂静止无功发生装置无法对中性线上的电流进行有效抑制,因此,能够为中性线电流提供通路四桥臂结构便发挥了作用。

考虑到多电平变换器体现出的谐波

含量低、开关损耗小以及输出波形质量高的诸多优点,采用四桥臂多电平逆变器作为SVG的主结构,能充分利用四桥臂逆变器和多电平逆变器的优良性能,具有较大的实际意义,结合成本投入和控制复杂度,三电平四桥臂是比较合适的选择。

文献[1-3]对三电平逆变器的结构进行了深入研究,分析了三电平结构的数学模型及工作原理,给出了相应的空间电压矢量脉宽调制技术。三电平相比于两电平的主要优点在于开关管承受的直流电压相比于两电平减小一半,由于电平数增加,输出电压谐波含量减少,同时,电压变化率较小,降低了电磁干扰。虽然三电平逆变器结构具有上述诸多优点,但是其控制十分复杂。文献[4]采用空间电压矢量控制方法对三电平逆变器进行控制,鉴于单个桥臂可以有三种开关状态,四桥臂可供选择的就有 $3^4=81$ 种,控制维度高,如何快速选择开关矢量将十分困难。对于三电平逆变器固有的中性点电位平衡问题,文献[5]采用PWM零序电压注入法,使单个开关周期内中性点电流平均值为零。文献[6]采用模糊控制方法,但模糊控制器的设计较为复杂。

本文鉴于以上问题,对三电平四桥臂逆变器的工作原理进行深入分析,采用基于载波同相层叠PWM的直接电流控制方法,对SVG四桥臂注入电网的补偿电流进行跟踪控制;实现了对由负载不平衡所导致的中性线电流的补偿;对于电容中性点电位平衡问题,采用电压双



王 磊/高级工程师

关键词/Keywords

三电平四桥臂·
载波层叠PWM·
不平衡负载·
均压控制·

闭环控制,将电容电压与直流侧总电压分别作为内外环控制量,实现电容的均压控制。仿真结果表明了所用方法的有效性。

工作原理及数学模型

1. 工作原理

NPC三电平四桥臂SVG主电路拓扑结构如图1所示。三电平四桥臂逆变器经过连接电感并入三相电网中,通过传感器实时采集负载侧的电压、电流及中性线上的电流信号,送入控制器中计算得到需要注入到系统中的补偿电流值指令,由电流指令经过载波层叠PWM调制后,得到驱动晶体管的脉冲信号,实现对系统的补偿。

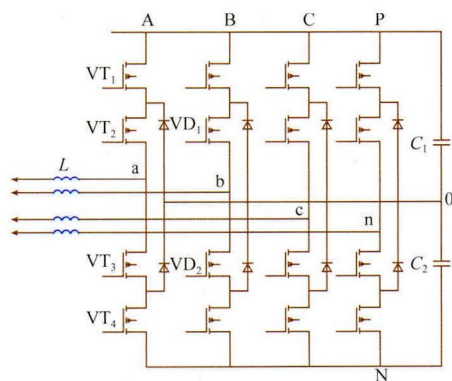


图1 三电平四桥臂SVG主电路拓扑结构

2. 开关函数数学模型

三电平四桥臂结构中,每个桥臂由四个晶体管及两个钳位二极管组成,为实现无功补偿的作用,能量在交流系统与直流电容之间双向流动,变换器工作于四象限状态,桥臂上总是相邻的两个晶体管导通,所以每个桥臂有三种工作状态,以A相为例,定义开关函数如下:

$$S_a = \begin{cases} 1 & \text{VT}_1, \text{VT}_2 \text{导通; VT}_3, \text{VT}_4 \text{关断} \\ 0 & \text{VT}_2, \text{VT}_3 \text{导通; VT}_1, \text{VT}_4 \text{关断} \\ -1 & \text{VT}_3, \text{VT}_4 \text{导通; VT}_1, \text{VT}_2 \text{关断} \end{cases} \quad (1)$$

以开关函数表示的SVG工作状态等效模型如图2所示。

等效模型中的开关量关系为 $S_{a1} + S_{a2} + S_{a3} = 0$ 。

当变换器工作于连续导电模式下,每个开关周期内运用开关函数表示的四桥臂中性点相对于直流电容负端N的电压关系式为

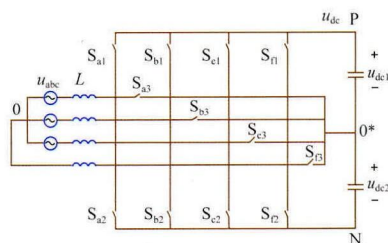


图2 三电平四桥臂SVG开关函数等效模型

$$\begin{cases} u_{AN} = S_{a1}(u_{c1} + u_{c2}) + S_{a3}u_{c2} \\ u_{BN} = S_{b1}(u_{c1} + u_{c2}) + S_{b3}u_{c2} \\ u_{CN} = S_{c1}(u_{c1} + u_{c2}) + S_{c3}u_{c2} \\ u_{FN} = S_{f1}(u_{c1} + u_{c2}) + S_{f3}u_{c2} \end{cases} \quad (2)$$

节点A、B、C和F相对于交流系统中性点O处的电压分别为电源电压减去连接电感上的电压降,即

$$\begin{cases} u_{AO} = u_a - L_a \frac{di_a}{dt} \\ u_{BO} = u_b - L_b \frac{di_b}{dt} \\ u_{CO} = u_c - L_c \frac{di_c}{dt} \\ u_{FO} = 0 - L_f \frac{di_f}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

由于连接电感工作在高频开关状态下,接入的电感值相对于工频来说非常小,因此在频率50 Hz系统中电感上的压降相对于电源相电压较小,上述方程可以近似为

$$\begin{cases} u_{AO} \approx u_a \\ u_{BO} \approx u_b \\ u_{CO} \approx u_c \\ u_{FO} \approx 0 \end{cases} \quad (4)$$

三相系统中又有 $u_a + u_b + u_c = 0$, 结合式(3)有 $u_{AO} + u_{BO} + u_{CO} = 0$, 可得

$$u_{iO} = u_{iN} + u_{NO} \quad i = A, B, C, F \quad (5)$$

联立上述方程可得三电平四桥臂SVG的数学模型为

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ 0 \end{pmatrix} - L \begin{pmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \\ \frac{di_f}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3}{4} & -\frac{1}{4} & -\frac{1}{4} & -\frac{1}{4} \\ -\frac{1}{4} & \frac{3}{4} & -\frac{1}{4} & -\frac{1}{4} \\ -\frac{1}{4} & -\frac{1}{4} & \frac{3}{4} & -\frac{1}{4} \\ -\frac{1}{4} & -\frac{1}{4} & -\frac{1}{4} & \frac{3}{4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{AN} \\ u_{BN} \\ u_{CN} \\ u_{FN} \end{pmatrix} \quad (6)$$

由式(2)、式(6)可得,电网电压、电流与直流侧电压和开关函数之间的关系。在电网电压一定的情况下,通过控制晶体管的开关动作,可以得到输出电流与直流电压的关系,由此可以得出,SVG发出的无功补偿电流是直流侧电容电压与交流侧电网电压之间相互作用产生的,若控制直流侧电压稳定,则可以通过控制晶体管的状态来调节补偿电流,因此直流电压的控制至关重要。

SVG控制策略

多电平载波PWM控制方法是指将调制波与载波进行比较得到一系列开关脉冲控制信号的方法,与两电平不同,多电平一般采用多个载波对调制波进行比较。一种是用多个幅值相同的三角波进行叠加,叠加后与调制波进行比较,得到多电平的PWM控制脉冲,称为载波层叠PWM法;另一种是利用多个幅值相同、相位不同的载波分别与调制波进行比较,所生成的PWM脉冲信号控制各组逆变桥,然后再叠加生成多电平PWM波,称为载波移相法。

1. 载波层叠PWM法

对于三电平逆变器,每个桥臂采用两个幅值相同、频率相同以及相位也相同的三角波作为载波,与同一个调制波进行比较,两个三角载波在空间上连续且对称分布于零参考的两侧,示意图如图3所示。

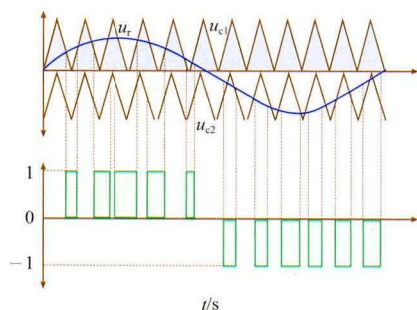


图3 载波层叠PWM法示意图

当调制波 u_r 大于0轴上方的载波 u_{c1} 时,为“1”状态,输出电压为 $U_d/2$,对应为钳位型三电平逆变器结构中桥臂上方两个晶体管导通;当调制波 u_r 小于下方的载波 u_{c2} 时,为“-1”状态,输出电压

为 $-U_d/2$,对应为钳位型三电平逆变器结构中桥臂下方两个晶体管导通;其余情况下为“0”状态,对应为桥臂中间两个晶体管导通的状态。

载波PWM具有输出波形好、谐波含量低、控制简单易于实现、可以应用于任何电平数的多电平逆变器结构中以及可以在整个调制比变化范围内工作的优点。

2. 直流电压控制

直流侧电压的控制应包括直流总电压的控制及直流侧两个电容上电压的均压控制。

(1) 直流总电压控制

由前文所述的数学模型可得,由于SVG的无功补偿作用是通过直流电容上的直流电压与交流系统电压之间的电压差在连接电感上产生补偿电流来实现的,维持直流侧电压的稳定对SVG发出实时、稳定的补偿电流十分必要。本文采用PI控制技术对直流电容上的电压进行控制,控制结构如图4所示。

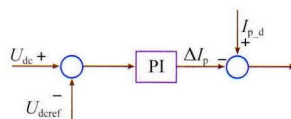


图4 直流电压控制原理

首先将直流电压检测出来,然后与直流电压参考值作比较,得出的误差信号经过PI控制器的调节后,叠加在上述负载电流处理后得到的有功直流分量上,这样SVG就可以通过从电网中吸收或者注入一定的有功功率来实现对直流电压的控制。

(2) 直流电容均压控制

三电平四桥臂SVG的主要结构是二极管钳位型结构,中性点电位平衡问题是其固有的问题,当两个电容连接点的电位发生变化时,就出现了中性点电位不平衡问题。

直流侧电容电压不平衡直接影响变换器的性能,如变换器交流侧输出电压谐波含量增加、低次谐波导致输出效率降低。不平衡时,某些晶体管承受的电压会上升,降低使用寿命,严重时导致开关器件击穿,降低系统的可靠性,同时电容自身的使用寿命也会降低。

三相不平衡系统中,三相电流中的零序分

量将通过电容流回到中性线，导致直流裂相电容端电压振荡，若振荡过于严重会引起直流电压失稳，影响补偿效果，因此，需要对两个电容上电压进行控制。

均压控制是在对直流侧电压进行PI控制基础上，增加一个控制外环，即将实际直流电压的一半与直流侧两个电容端电压进行比较，经过PI控制后叠加在指令电流的输出端，均压控制原理如图5所示。

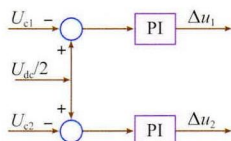


图5 电容均压控制原理

3. 无功指令电流检测

无功电流检测采用文献[7]中改进的零序电流分离方法来检测不平衡负载中的零序电流，从而可以得到相应的无功补偿指令电流，有效实现对不平衡系统的无功补偿。

在无功指令检测基础上，加入上述的直流电压控制指令信号，通过控制SVG与交流电网之间的电流来实现对直流电压的控制。当直流电压下降时，SVG从交流网络吸收一部分有功功率；当直流电压上升时，向交流网络注入部分有功功率，以此来维持直流电压的稳定。考虑直流电压控制部分的无功指令检测框图如图6所示。

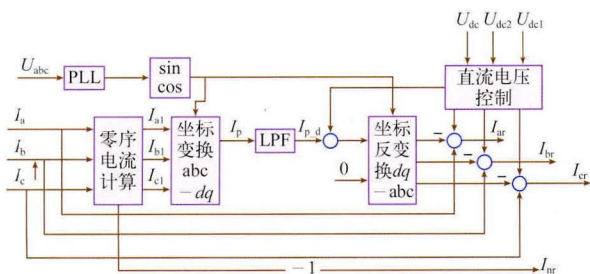


图6 计及电压控制的无功指令检测原理

图中， I_a 、 I_b 和 I_c 为三相负载电流；经过零序电流检测模块得到去除零序分量的三相电流 I_{a1} 、 I_{b1} 和 I_{c1} ；在此过程中由三相电流相加并取反得出中性线电流补偿指令 I_{nr} ；将经过坐标变换后得到的有功电流分量经低通滤波后与电压控制模块的

电压误差信号叠加，反坐标变换到abc坐标系下，将三相分量与三相负载电流及直流电压误差控制信号叠加后，得到SVG所需的无功补偿指令信号 I_{ar} 、 I_{br} 和 I_{cr} 。

仿真分析

1. 仿真模型

为验证所提SVG控制策略及直流电压控制的有效性，本文在Simulink中采用载波层叠PWM法控制的三电平四桥臂SVG进行了仿真验证，由上述分析可得，仿真模型主要由交流不平衡系统模块、SVG模块、无功指令检测模块、直流电压控制模块及脉冲生成模块组成，如图7所示。

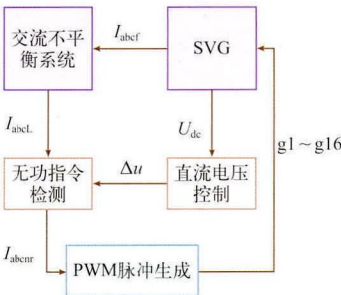


图7 仿真结构

图中， I_{abcl} 、 I_{abcf} 和 I_{abcnr} 分别为三相负载电流、SVG三相补偿电流及无功补偿电流指令； Δu 为直流侧电容电压误差信号。

基于所提控制方法及上述结构图进行仿真验证，仿真参数如下：三相电源的线电压有效值为380 V；频率为50 Hz；SVG直流侧两个电容均为8 000 μ F；直流侧电压设定值为850 V；连接电感为1.5 mH；不平衡负载：A相有功为30 kW，无功为30 kvar；B相有功为20 kW，无功为20 kvar；C相有功为40 kW，无功为40 kvar，仿真时间为0.3 s。

2. 仿真波形分析

仿真过程中，首先是电网电压向直流侧电容的充电过程，然后0.1 s时投入SVG。0.1 s之前，在上述不平衡阻感负载的情况下，三相平衡电网电压作用于负载产生三相不平衡的电流，如图8所示。由于感性负载的作用，导致电流相位滞后于电压，功率因数降低。0.1 s SVG投入运行后控制

系统检测负载无功电流, 根据各相需要补偿的无功程度, 发出三相不平衡的无功补偿电流, 其波形如图9所示, 使电网三相电流恢复正常平衡运行状态, 同时, 补偿后电网电压和电流相位相同, 提高了功率因数。

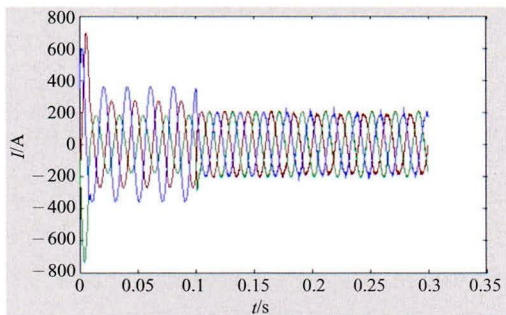


图8 补偿前后三相电网电流波形

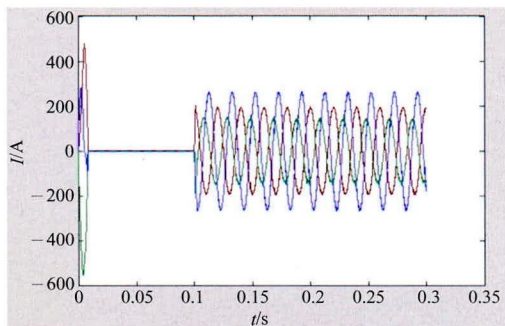


图9 SVG输出的三相补偿电流波形

以A相为例, 补偿前后电网电流之间的相位关系如图10所示。由图10可以看出, 0.1 s时SVG投入运行后, 电流相位趋于同相, B相和C相类似。

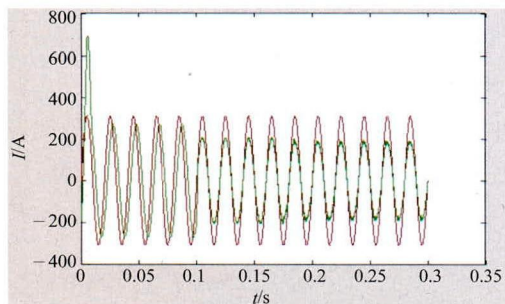


图10 补偿前后A相电网电流相位波形

图11为补偿前后系统中性线上的电流波形。0.1 s之前, 由于三相负载不平衡, 因此会在中性线上产生一定的零序电流, 由图中可以看出, 在0.1 s时SVG投入, 零序电流得到了补偿, 减少了零序电流对系统的危害。

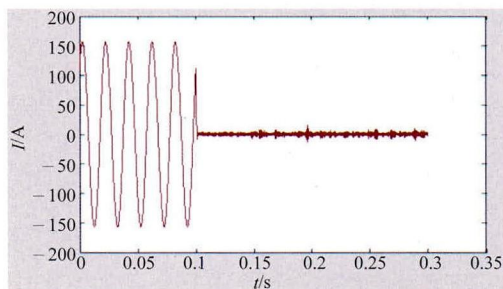


图11 补偿前后中线电流波形

图12为SVG直流侧电容 C_1 、 C_2 端电压及直流总电压波形。开始时, 交流电网通过连接电感和等效损耗电阻为直流侧电容充电并保持稳定, 0.1 s SVG投入运行后, 在直流电压控制作用下, 直流总电压维持在850 V左右, 略有波动, 两个直流电容上的电压经过均压控制后出现波动且电压值大致相同。以上结果表明直流电压控制和均压控制有一定的效果, 但还需要进一步的优化改进, 以提高波形质量。

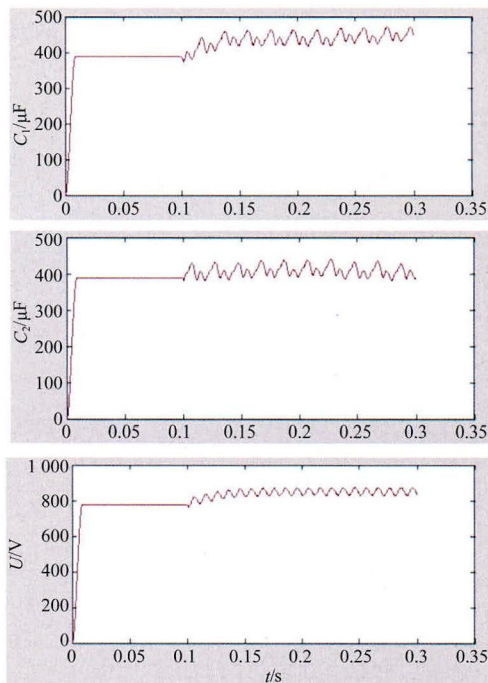


图12 直流侧电容及总直流电压波形

结束语

为了解决负载不平衡或者非线性负载在中性线上积累中性线电流的问题, 在传统三桥臂SVG (下转第46页)

- 统小扰动稳定性的影响 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (5): 5-8.
- [4] 洪兰秀, 杨莉, 邱家驹, 等. 含自动发电控制信号时滞的区域互联电网AGC控制模式研究 [J]. 华东电力, 2006, 34 (3): 23-27.
- [5] 江全元, 白碧蓉, 邹振宇, 等. 计及广域测量系统时滞影响的TCSC控制器设计 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (24): 21-25.
- [6] 杨晓静, 赵书强, 马燕峰. 采用广域测量信号的PSS参数优化设计 [J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (3): 47-50.
- [7] 胡志祥, 谢小荣, 童陆园. 广域阻尼控制延迟特性分析及其多式拟合补偿 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (20): 29-34.
- [8] Snyder A F. A robust damping controller for power system using linear matrix inequalities [C]. Proceeding of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, USA, 1999, 1: 519-523.
- [9] Wu Hongxia, Ni Hui, Heydt G T. The Impact of Time Delay on robust control design in power system [C]. Proceedings of Power Engineering Society Winter Meeting, New York, USA: 2002, 2: 1511-1516.
- [10] 王成山, 石颀. 考虑延迟影响的电力系统稳定器设计 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (10): 1-6.
- [11] 何正友, 符玲, 麦瑞坤, 等. 小波奇异熵及其在高压输电线路故障选相中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (1): 31-36.
- [12] 李宽, 李兴源, 赵睿. 基于改进矩阵束的高压直流次同步振荡检测 [J]. 电网技术, 2012, 36 (4): 128-132.
- [13] 袁野, 程林, 孙元章, 等. 广域阻尼控制的时滞影响分析及时滞补偿设计 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (14): 6-9.
- (收稿日期: 2014-04-01) EA

(上接第42页)

基础上增加一条桥臂为中性线电流提供通路并进行控制, 比较了两电平四桥臂及三电平四桥臂的优缺点后, 应用三相三电平四桥臂作为SVG的主结构, 并设计了基于载波层叠PWM方法的SVG控制策略及直流侧电容电压的均压控制方法, 搭建仿真模型验证其效果。结果表明, 上述控制策略可以在对系统有效无功补偿的基础上对三相四线制中由不平衡负载所造成的中性线电流进行补偿, 减小对系统的影响, 使功率因数得以提高, 系统稳定运行能力增强; 同时直流侧电容上的电压得以控制并均匀分配, 但从直流侧电压的波动情况来看, 所应用的均压控制方法还需要进一步优化处理。

参考文献

- [1] 顾和荣, 王德玉, 沈虹, 等. 三相四桥臂逆变器控制技术研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011 (24): 41-46.
- [2] 张崇巍, 苑春明, 张兴. 中点电位平衡的三电平逆变器SVPWM简化算法及其实现 [J]. 电气传动, 2008 (11): 37-41, 48.
- [3] 申张亮, 郑建勇, 梅军. 基于改进虚拟空间矢量调制方法的中点箝位型三电平逆变器电容电压平衡问题 [J]. 电力自动化设备, 2011 (3): 79-84.
- [4] 宋文祥, 丁肖宇, 束满堂, 等. 三电平逆变器空间矢量脉宽调制及其实现 [J]. 电力电子技术, 2005 (5): 13-14, 30.
- [5] 姜卫东, 杨柏旺, 黄静, 等. 不同零序电压注入的NPC三电平逆变器中点电位平衡算法的比较 [J]. 中国电机工程学报, 2013 (33): 17-25, 3.
- [6] 陈鑫兵, 何礼高. 基于模糊控制的三电平逆变器中点电位平衡策略 [J]. 电工技术学报, 2007 (10): 103-108.
- [7] 王存平, 尹项根, 熊卿, 等. 一种改进的ip-iq无功电流检测方法及其应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2012 (13): 121-126.
- (收稿日期: 2015-01-07) EA