

# Delta 变换型 UPS 的控制策略及仿真研究

刘维昱, 沈颂华

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 简单介绍了三相 Delta 变换型不间断供电电源(UPS)的结构组成和其区别于传统在线式 UPS 的优点。依据 UPS 系统的电压补偿工作原理和功率因数校正工作原理,详细分析了串联 Delta 变换器和并联主变换器的工作状态及其在 UPS 系统中的重要作用。基于同步旋转坐标系下的  $d-q$  变换法,对电流增量和不对称有畸变的市电电压进行检测。进而详细研究了正弦脉宽调制(SPWM)控制器的控制策略,Delta 变换器和主变换器分别受控为标准正弦波电流源和标准正弦波电压源。最后,通过详细分析系统特性仿真结果,验证了 Delta 变换型 UPS 整机运行方式,证明了该控制策略的可行性。

**关键词:** Delta 逆变技术; UPS; 主变换器; Delta 变换器

**中图分类号:** TM 464

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2007)04-0014-05

不间断供电电源(UPS)具有稳压、稳频、抗干扰、防止浪涌等功能,更为重要的是当电网停止供电时,UPS 还可以对负载进行短时供电。因此,UPS 日益成为重要负载设备必不可少的配套设施<sup>[1]</sup>。Delta 逆变技术<sup>[2]</sup>是一项产生于 20 世纪末的新技术,它真正的技术属性是电力调节设备中的串并联电路结构。

## 1 电路结构

Delta 变换型 UPS(如图 1 所示)的结构<sup>[3]</sup>主要是由串联补偿变压器、Delta 变换器、主变换器、主静态开关、旁路开关以及蓄电池组等部分构成。Delta 变换器通过串联补偿变压器接在电路的输入端对市电输入量进行连续的监视和补偿;主变换器在电路的输出端与负载并联,对输出量进行连续的监视和补偿,和传统 UPS 相比是一种双在线调整。

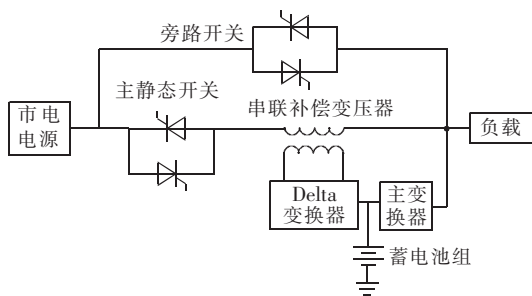


图 1 Delta 变换型 UPS 结构图

Fig.1 Structure of Delta-conversion type UPS

Delta 变换型 UPS 技术具有以下优点:负载从并联主变换器的输出获得电压且电压稳定;串联 Delta 变换器只对市电输入电压与标准额定电压之间的差值进行调整和补偿,Delta 变换型 UPS 的整机效率高(市电电压波动的范围在  $\pm 15\%$ ,所以 UPS 工作时承担的功率小,最大时也仅为系统输出功率的  $20\%$ );功率余量大,能有效实现高功率因数和小谐波电流。

收稿日期:2006-07-26;修回日期:2006-11-16

## 2 工作原理

Delta 变换型 UPS 的电路是一种串并联调整结构(如图 2 所示三相 Delta 变换型 UPS 主电路框图):Delta 变换器主要是由  $D_1 \sim D_6$  组成可双向四象限工作的三相半桥式高频 PWM 变换器,其输出通过电感( $L_1, L_2, L_3$ )、串联补偿变压器( $T_1, T_2, T_3$ )和负载串联连接而形成串联调整。主变换器也是可双向四象限工作的三相半桥式结构,主要由  $M_1 \sim M_6$  组成,通过其  $L_{F2}, C_{F2}$  直接与负载并联从而形成并联调整。三相市电电压输入为  $u_a, u_b, u_c$ ,蓄电池电压为  $E_b$ ,直流侧电压为  $U_{dc}$ 。

### 2.1 电压补偿工作原理

以图 3 所示说明市电电压波动补偿原理<sup>[4]</sup>。

如图 3(a)所示市电输入电压  $u_i$  升高,Delta 变换器应在其串联补偿变压器的副边侧产生一个负补偿电压  $u_c$ ,以对市电电压进行负补偿,保持负载电压  $u_L$  稳定为标准参考电压  $u_r$  不变。

$$-u_c = -(u_i - u_r) \Rightarrow u_L = u_i - u_c = u_r \quad (1)$$

由于市电电压  $u_i$  的升高,使 UPS 电路中 A 点电压上升,主变换器的控制电路为保持负载电压不变,就会调节主变换器使其输出电压  $u_M$  降低。其后果是使  $u_L > u_M$ ,并迫使主变换器工作在整流状态向蓄电池充电,直流电压  $U_{dc}$  上升并与直流参考电压  $U_{der}$  比较产生出  $\Delta U_{dc}$ ,作为反馈信号控制 Delta 变换器,使其在输出变压器的副边产生一个负补偿电压  $u_c$ 。设串联补偿变压器副边绕组阻抗为  $Z$ ,市电输出电流  $i$  与市电电压同相位,则  $Zi$  与  $u_i$  方向相反,补偿电压  $u_c$  也与  $u_i$  方向相反。当  $U_{dc}$  上升到某一值时,主变换器输出电压上升到稍大于负载电压  $u_L$  时,主变换器由整流状态变换到逆变状态。此时,Delta 变换器吸收功率,主变换器输出功率。当吸收功率等于输出功率时,达到平衡。市电电压低于参考电压的补偿原理相同,电流流向及补偿电压方向均如图 3(b)所示。

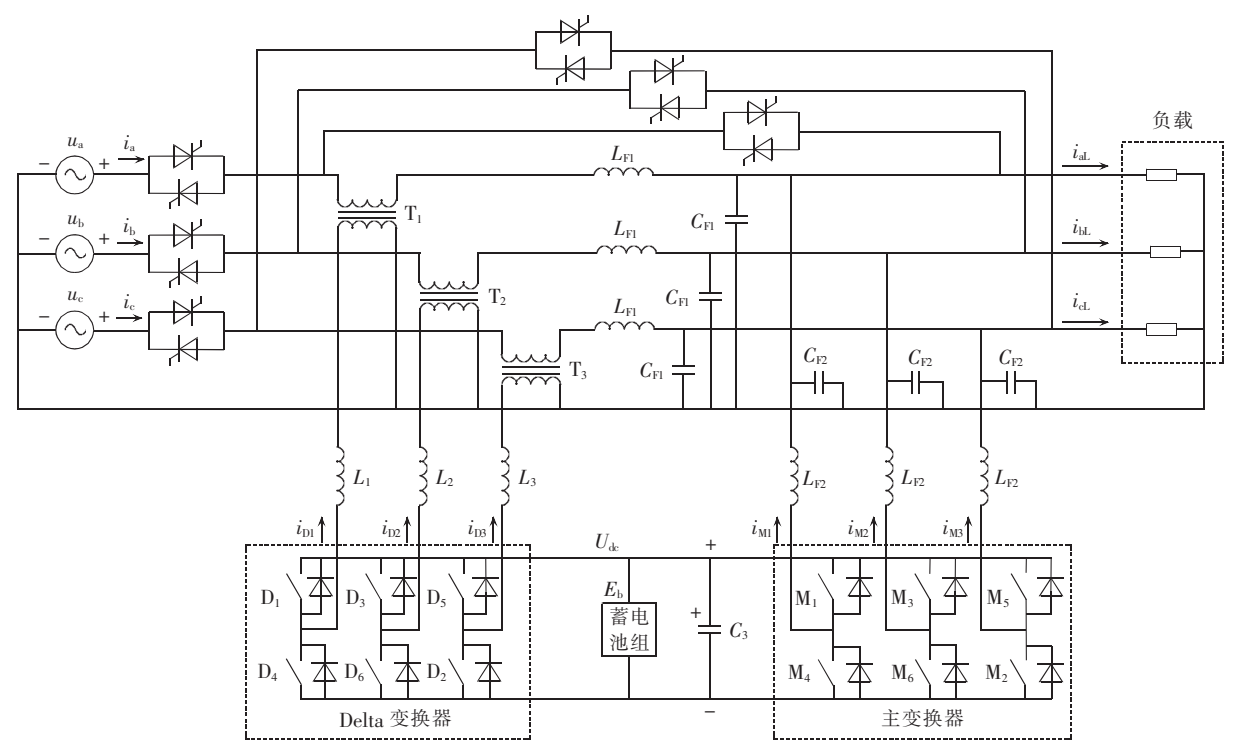


图 2 三相 Delta 变换型 UPS 主电路框图  
Fig.2 Main circuit of Delta-conversion type UPS

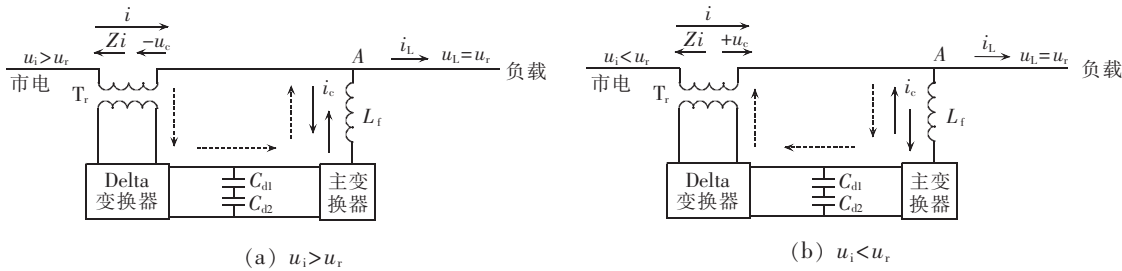


图 3 市电电压波动补偿示意图  
Fig.3 Compensation for voltage fluctuation

2.2 功率因数校正工作原理<sup>[5]</sup>

高频双向 Delta 变换器串联在主电路中,相当于一个标准正弦波电流源,主要起有功补偿和谐波隔离作用,是一个典型的功率因数校正电路。用开关 S 模拟 Delta 变换器的正弦脉宽调制 (SPWM) 开关动作方式,则图 4 所示电路可等效 Delta 变换器功率因数校正原理图。

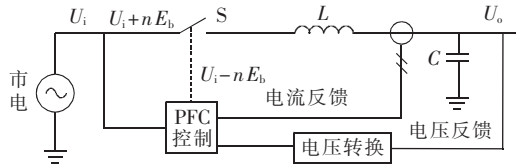


图 4 功率因数校正原理图

Fig.4 Principle of power factor correction

- a. 开关 S 工作周期为  $T$ , S 接通时 Delta 变换器输出功率, 接通时间为  $t_{on}$ ; S 断开时变换器吸收功率, 断开时间为  $t_{off}$ 。
- b. 由于 S 的工作周期远小于 20 ms, 所以可近似在直流状态下对图 4 所示电路进行分析。
- c. 由于 S 的工作周期远小于由电感和电容组成

的时间常数, 所以可近似认为电感的充放电电流是线性的。

输出电压  $U_o$  等于输入电压  $U_i$  加上一个增量电压  $\Delta U$ :

$$\Delta U = n E_b (t_{on} - t_{off}) / T \quad (2)$$

其中, 电池电压  $E_b$  和变压器匝比  $n$  的乘积成正比,  $n, E_b, T$  都是常数, 而  $t_{on}$  和  $t_{off}$  的相对变化是符合正弦函数规律的波形, 所以在一个周期中  $\Delta U$  也是正弦波形, 与输入电压  $U_i$  叠加后, 输出电压  $U_o$  也是正弦波。

Delta 变换器的工作周期也是固定不变的,  $t_{on}$  和  $t_{off}$  的相对变化只与电池电压  $E_b$  有关。因此, 在稳态情况下, 输入电流  $i(t)$  的变化规律只与输入电压有关, 在输入电压  $U_i$  波形按正弦规律变化时, 其输入电流  $i(t)$  也发生相应变化, 使其成为与输入电压  $U_i$  完全相同的正弦波。

3 控制策略

3.1 电压和电流增量检测方法

$d-q$  变换法是将静止坐标系中的相量变换到以

基波角速度旋转的坐标系中。对电流增量的检测和不对称有畸变的市电电压检测,  $d-q$  谐波计算方法都能很好地满足检测要求<sup>[6-7]</sup>。

瞬时三相电压或电流通过公式(3)的坐标变换, 变换到  $d-q$  坐标上:

$$\begin{aligned} f_{dq} &= \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_o \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{f}_d + \tilde{f}_d \\ \bar{f}_q + \tilde{f}_q \\ f_o \end{bmatrix} \\ C &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\omega t & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\omega t & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3}$$

其中,  $d$  轴直流分量  $\bar{f}_d$  对应负载的有功功率;  $q$  轴直流分量  $\bar{f}_q$  对应三相对称负载基波的无功功率;  $\tilde{f}_d$  和  $f_o$  对应三相不对称负载基波及高次谐波无功功率。

如图 5 所示,  $f_a, f_b, f_c$  为三相输入信号(瞬时三相电压信号  $u_a, u_b, u_c$  或者三相电流信号  $i_a, i_b, i_c$ ), 经过  $d-q$  变换和低通滤波器滤除所有交流谐波后, 其直流成分再通过  $d-q$  反变换就计算得到基波输出信号( $f_{ap}, f_{bp}, f_{cp}$ ), 它们之差即为三相谐波信号  $f_{ah}, f_{bh}, f_{ch}$ 。  $d-q$  变换是将静止坐标系中的相量变换到以基波角速度旋转的坐标系中, 变换后的信号与原信号频率相差一个基波频率。

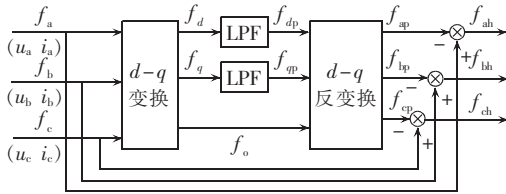


图 5  $d-q$  法检测原理

Fig.5 Block diagram of the  $d-q$  method

3.2 Delta 变换器控制策略

负载含有非线性负载时, 负载电流将会与市电电压不同相位, 并产生畸变。负载电流( $i_L$ )分别由基波有功电流( $i_p$ )、无功电流( $i_q$ )及谐波电流( $i_h$ )组成。

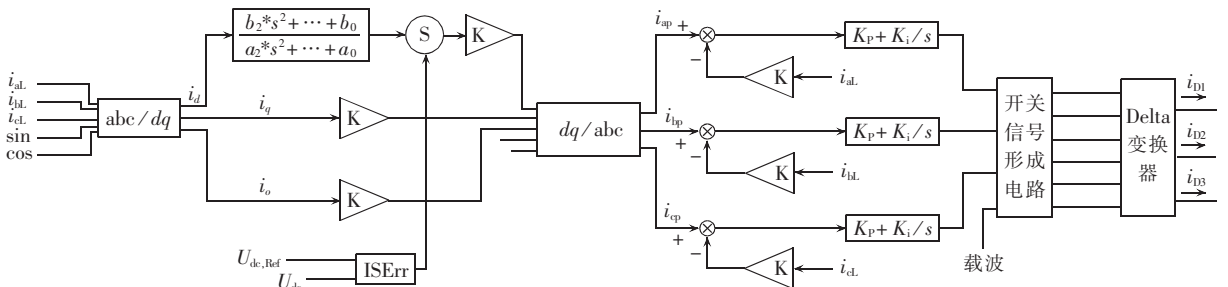


图 6 Delta 变换器控制框图

Fig.6 Control of Delta converter

如式(4)所示, 下标 1 代表基波,  $I_{lm}$  代表基波峰值。

$$\begin{aligned} i_p &= I_{lm} \cos \varphi_1 \sin \omega t \\ i_q &= I_{lm} \sin \varphi_1 \cos \omega t \\ i_h &= \sum_{n=2}^{\infty} I_{lm} \sin(n \omega t + \varphi_n) \end{aligned} \tag{4}$$

Delta 变换器受控为正弦电流源, 2 个反馈信号输入作为 Delta 变换器控制信号<sup>[8]</sup>: 一是负载电流  $i_L$  的反馈信号, 用来消除市电输入电流中的无功与谐波分量, 使市电输出电流与市电电压同相位, 输入功率因数等于 1; 另一个是蓄电池电压反馈信号  $\Delta U_{dc}$ , 它是由蓄电池电压  $E_b$  通过与其基准电压进行比较后产生的。  $\Delta U_{dc}$  用来补偿市电电压的波动, 并使市电的输入功率与负载所需的功率达到平衡。由于市电输出电流与市电电压同相位, 所以在变换器的控制信号中加入  $\Delta U_{dc}$  控制信号, 就可以实现对市电电压波动的补偿。

如图 6 所示, UPS 系统中提取检测出来的负载电流( $i_{aL}, i_{bL}$  和  $i_{cL}$ ) 首先经过三相静止到两相同步旋转坐标变换( $abc/dq$ ) 成为信号  $i_d, i_q$  和  $i_o$ , 由于源电流无需无功成分, 所以应将控制电流  $q$  轴比例系数  $K$  设置零。同时, 引入直流总线  $\Delta U_{dc}$  作为 Delta 控制器的输入。再经坐标变换( $dq/abc$ ), 控制变量变换为三相参考量( $i_{ap}, i_{bp}, i_{cp}$ ), 负载电流除去已经分离出来的基波有功分量( $i_L - i_p = i_q + i_h$ ), 就得到 Delta 变换器的调制波指令信号, 分别与三角波载波比较后即可获得 Delta 变换器的 PWM 开关信号。采用 SPWM 控制电路进行控制, 补偿市电输入电流中的无功电流  $i_q$  与谐波电流  $i_h$ 。

3.3 高频主变换器控制策略

若市电电压中含有基波电压  $u_1$  和谐波电压  $u_h$ , 则其可用方程式(5)表示(下标 1 代表基波, 下标  $m$  代表峰值)。

$$u_s = u_1 + u_h = U_{lm} \sin \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} U_{lm} \sin n \omega t \tag{5}$$

并联主变换器受控为正弦电压源, 输出电压  $u_L$  等于正弦基准电压  $u_r$ , 且与输入市电基波同相。与 Delta 变换器控制相似, 到三相坐标系下经过( $abc/dq$ ) 坐标变换, 检测出电压谐波分量和电网电压波动值, 然后分别和三角波载波比较即可得到主变换器的 PWM 开关信号<sup>[9-10]</sup>。

根据上述算法, Delta 变换器受控为电流源, 源电流是与电源电压同相的正弦波。因此, 并联主变

换器补偿非线性负载的谐波和无功成分。同时,并联主变换器受控为电压源,输出电压是与市电电压基波同相的正弦波,从而使得电源电压中的谐波和基波偏差经串联 Delta 变换器得到补偿。

4 整体仿真结果分析

基于上述控制策略,在 Saber 环境下建立了系统的连续域仿真模型,三相主电路如图 2 所示,并对其工作特性进行了仿真。图中交流市电电源是标准相电压 220 V,在其额定值±15 % 范围变化;电网所含 5 次、7 次谐波电压分别为基波电压值的 10 % 和 5 %。负载为三相不控整流桥,负载电阻为 35 Ω。直流端接蓄电池组电压:  $E_b=400\text{ V}$ ,直流侧电容参数  $C_3=4\text{ 700 }\mu\text{F}$ ,平衡电感参数分别选择:  $L_{F1}=0.5\text{ mH}$ ,  $L_{F2}=0.5\text{ mH}$ 。感性负载时串联电感  $L=200\text{ mH}$ ,容性负载时并联电容  $C=20\text{ }\mu\text{F}$ 。逆变控制载波比选用 400。

图 7(a)是含谐波的电网电压和非线性负载时 a 相输入电流。采用图 6 所示控制策略,检测出图 7(b)所示 a 相的补偿电流  $i_c$  和补偿电压  $u_{co}$ 。

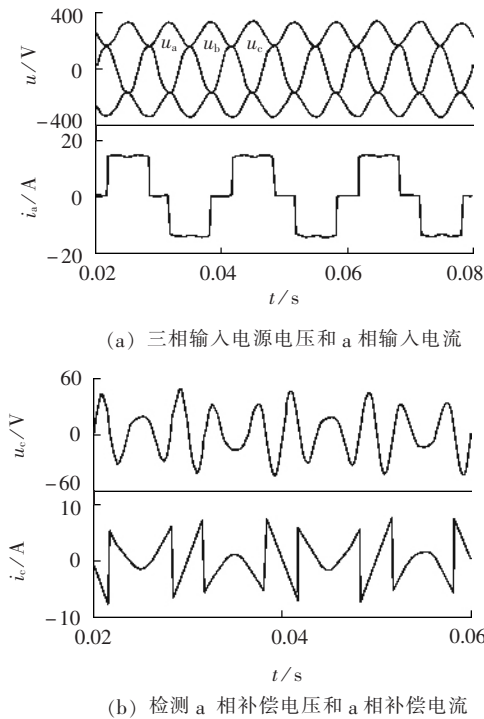
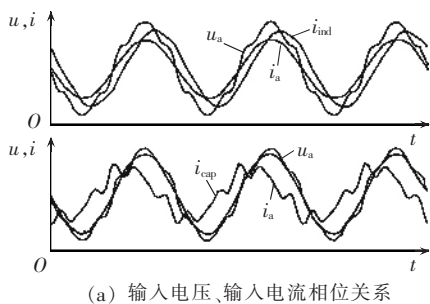


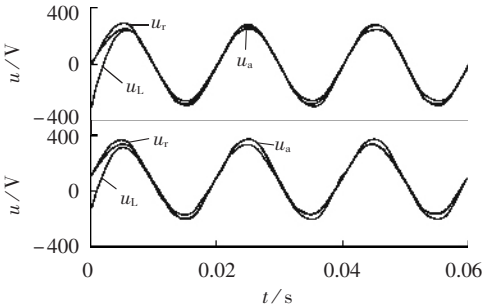
图 7 检测电压和电流波形

Fig.7 Waveforms of detected voltage and current

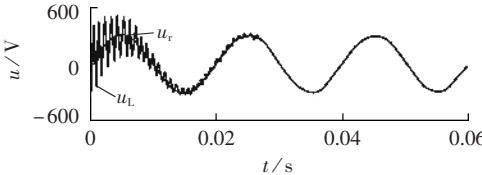
图 8 表示 Delta 变换器和主变换器整体配合工作的仿真波形,(a)图所示对 a 相输入电流  $i_a$  和电压



(a) 输入电压、输入电流相位关系



(b) a 相输入电压、负载电压波形



(c) 电网掉电 a 相负载电压波形

图 8 UPS 补偿电流、电压波形

Fig.8 Waveforms of UPS compensation voltage and current

$u_a$ ,以及感性负载和容性负载未经过补偿时的电流波形  $i_{ind}$ 、 $i_{cap}$  之间的相位关系。(b)图分别为电网电压  $u_a=0.85\text{ }u_r$ (上图)和  $u_a=1.15\text{ }u_r$ (下图) 2 种工况下,经过 UPS 的电压补偿之后负载电压  $u_L$  的示波图。(c)图表示电网掉电时,由蓄电池提供 100 % 负载功率时 a 相负载电压波形。

5 结语

首先,简单介绍了 Delta 变换型 UPS 的组成和特点,并对系统中关键的 Delta 变换器和主变换器的工作原理以及电路进行了详细分析。分别给出了补偿电压和补偿功率因数的仿真结果,最后得到 UPS 整机工作的补偿波形,从而验证了 Delta 逆变技术稳定、可行。

参考文献:

[1] 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,2004.  
[2] 刘凤君. Delta 逆变技术及其在交流电源中的应用[M]. 北京:机械工业出版社,2003.  
[3] 刘希禹. UPS 系统技术和 Delta 变换 UPS 系统[J]. 邮电设计技术,2000(6):17-28.  
LIU Xi - yu. UPS system technology and Delta conversion UPS system[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications,2000(6):17-28.  
[4] NASIRI A,BEKIAROV S B,EMADI A. Reduced parts three-phase series-parallel UPS system with active filter capabilities [C] //38 th IAS Annual Meeting. Salt Lake City,USA:IEEE,2003:963-969.  
[5] 刘凤君. 具有不对称电流补偿功能的三相串并联补偿式 UPS[J]. 电源技术应用,2005(9):1-10.  
LIU Feng - jun. Three - phase series - parallel compensation UPS with function of unsymmetrical current compensation [J]. Power Supply Technologies and Applications,2005(9):1-10.  
[6] 戴列峰,蒋平,田大强. 无锁相环 d-q 谐波电流检测法的实现[J]. 电网技术,2003,27(8):46-49.  
DAI Lie - feng,JI ANG Ping,TIAN Da - qiang. Realization of

- harmonic current detection of  $d-q$  transformation without phase lock loop[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 46-49.
- [7] 孙驰, 魏光辉, 毕增军. 基于同步坐标变换的三相不对称系统的无功和谐波电流的检测[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 43-48.
- SUN Chi, WEI Guang-hui, BI Zeng-jun. Detection for reactive and harmonics currents of unbalanced three-phase systems based on synchronous reference frame transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 43-48.
- [8] 李勋, 戴珂, 杨荫福, 等. 双变流器串-并联补偿式 UPS 控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 104-108.
- LI Xun, DAI Ke, YANG Yin-fu, et al. Study of control strategy for series-parallel compensated UPS with double converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 104-108.
- [9] da SILVA S A O, DONOSO - GARCIA P F. A three-phase series-parallel compensated line-interactive UPS system with sinusoidal input current and sinusoidal output voltage[C]//34th IAS Annual Meeting. Phoenix, USA: IEEE, 1999: 826-832.
- [10] da SILVA S A O, DONOSO - GARCIA P F. A comparative analysis of control algorithms for three-phase line-interactive UPS systems with series-parallel active power-line conditioning using SRF method[C]//Power Electronics Specialist Conference. Galway, Ireland: IEEE, 2000: 1023-1028.
- [11] 刘凤君. 采用 SPWM 单相全桥逆变器串并联的多电平逆变器[J]. 电源技术应用, 2006(10): 6-12.
- LIU Feng-jun. Cascade-parallel multilevel full bridge inverters with SPWM [J]. Power Supply Technologies and Applications, 2006(10): 6-12.
- [12] 李勋, 朱鹏程, 戴珂, 等. 双变流器串-并联补偿式 UPS 控制系统[J]. 电气传动, 2003(6): 35-38.
- LI Xun, ZHU Peng-cheng, DAI Ke, et al. Control system for series-parallel compensated UPS with double converters [J]. Electric Drive, 2003(6): 35-38.

(责任编辑: 李 玲)

#### 作者简介:

刘维罡(1979-), 男, 河北宁晋人, 博士研究生, 研究方向为检测技术与自动化装置(E-mail: adou79@asee.buaa.edu.cn);  
沈颂华(1942-), 男, 上海人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电气系统的检测技术与自动化装置、功率变换技术、飞机电气系统的综合管理与监控。

## Control strategy and simulation research of Delta-conversion type UPS

LIU Wei-gang, SHEN Song-hua

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The structure of Delta-conversion type UPS (Uninterruptable Power Supply) and its distinguished merits from the traditional on-line UPS are presented. Based on principles of the voltage compensation and the power factor correction, the working states of the series Delta converter and the parallel main converter and their importance in the whole UPS are analyzed. By controlling the Delta converter as a fundamental sine current source and the main converter as a fundamental sine voltage source, the control strategy of SPWM (Sine Pulse Width Modulation) controller are investigated based on the  $d-q$  method. The detailed analysis of system performance simulation verifies the operation mode of Delta-conversion type UPS and its feasibility.

**Key words:** Delta-conversion technology; UPS; main converter; Delta converter