

# 一种新型的三相交流稳压电源

顾雪锋, 姜晓亮, 孙频东

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 在分析了现有的三相交-交变压电源后, 提出了一种新颖的三相交-交变压和稳压方法, 该方法借助于三相电子开关, 将直流电压变换原理应用到三相交流的变压、稳压中, 克服了使用传统晶闸管调压电路带来的功率因数低和谐波污染问题. 与使用串联补偿构成的三相调压电路相比该电路具有简单, 电压调节范围大等优点. 在描述了系统的构成、工作原理和数学模型后, 对该电源系统的控制策略作了简要分析和说明, 最后给出了电源系统的仿真结果和在样机上的实验结果.

[关键词] 变流稳压, 交流变压, 三相电源, Cuk 电路

[中图分类号] TM 395.7 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2009)03-0008-06

## A Novel Three Phase AC Source With Output Voltage Variable Continuously and Regulated

Gu Xuefeng Jiang Xiaoliang Sun Pindong

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract** A new kind of three-phase ac-ac converter with regulated output voltage or with output voltage variable continuously has been proposed. Cuk circuit, normally used in dc-dc voltage conversion, is employed in this converter with the help of three-phase electrical switches. Compared to the traditional ac-ac converter employ thyristors to regulate ac power, i.e. phase-controlled ac-ac converters and existing line conditioners, this converter is smaller in size, higher in efficiency, less low-order in harmonics and larger in voltage adjustable range. The analysis of operating principle and control strategy of the proposed topologies are presented. Computer simulation and experimental result of the converter are also presented at the end of the paper.

**Key words** regulated AC source; variable output AC source; three-phase AC; Cuk circuit

交流调压、稳压技术在供、用电系统中具有十分重要的意义, 在由再生能源构成的分布式发电系统中也有十分重要的用途, 通常的电力变压器只能提供有级的电压调节, 一般还不能稳压. 由于投资成本和庞大的体积, 有些地方使用电力变压器还十分不便, 因此, 电力电子技术被应用到需要变频变压的场合. 不过, 在很多不需要变频, 只需要变压和稳压场合, 使用变频器确实有些浪费, 而使用传统的由晶闸管构成的交流调压电路<sup>[1]</sup>如图 1 所示, 不仅结构复杂, 功率因数低, 通常输出电压也只能向下调节. 因为开关器件的使用量较多, 所以控制电路相对复杂, 而且会产生大量的谐波, 容易对电网构成干扰, 因此并不是一种理想的选择. 另一种被使用在可再生能源并网控制中的电路<sup>[2-3]</sup>如图 2 所示, 当电网电压会发生突降时, 通过串联补偿的方法来提高输出电压值, 图中的调压电路输出电压可变, 根据实际需要调节输出电压的大小, 以达到补偿电压降的目的. 存在的问题是电路结构比较复杂. 用 SPWM 技术也能实现调压, 但电路比较复杂, 而且往上调节的电压幅度不大. 本文提出一种能实现交流变压、稳压的电力装置, 借助于在直流电源中使用电压变换技术, 在交流电源的稳压和无级变压上有较好的性能.

### 1 调压原理及系统构成

借助直流变压的原理, 可以提出多种可用于交流变压稳压的电路结构<sup>[4]</sup>, 这里综合考虑各种不同的负载特性和电路电压调节范围和复杂程度, 提出两种变换的结构.

收稿日期: 2009-03-06

通讯联系人: 孙频东, 副教授, 研究方向: 电力电子. E-mail: sunpindong@njnu.edu.cn

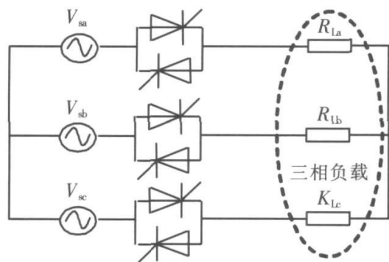


图 1 传统的可控硅交流调压电路

Fig.1 Traditional phase controlled converter to regulate ac voltage

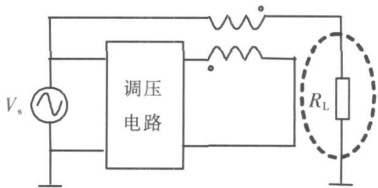


图 2 串联式交流调压电路

Fig.2 ac-ac conditioner

1.1 三相平衡负载

三相平衡负载,如图 3 所示.在电容  $C_1$  的两侧附加二组三相电子开关,以构成对三相输出电压值的调节,该调压电路的等效单相电路如图 3(b) 所示,使用单相等效电路能方便对其工作原理进行分析.三相电子开关  $S_1$  和  $S_2$  由 IGBT 管构成,为互补开关,当  $S_1$  闭合时,  $S_2$  断开;而当  $S_1$  断开时,  $S_2$  闭合.工作过程可分两个阶段,简单描述如下:

- 阶段 1  $S_1$  闭合,  $S_2$  断开.电感  $L_1$ 、 $L_2$  储能,电容  $C_1$  储能对负载电阻  $R_{L1}$  放电;
  - 阶段 2  $S_1$  断开,  $S_2$  闭合.电容  $C_1$  储能,电容  $C_2$  对负载电阻  $R_{L1}$  供电;
- 其单相等效电路为一能实现能量双向流动的具有电压提升/降低功能的 Cuk 电路.

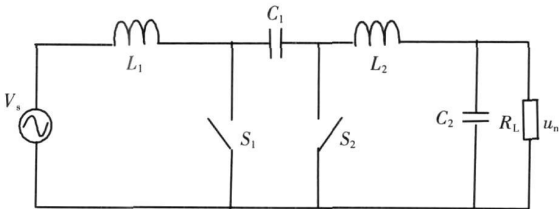
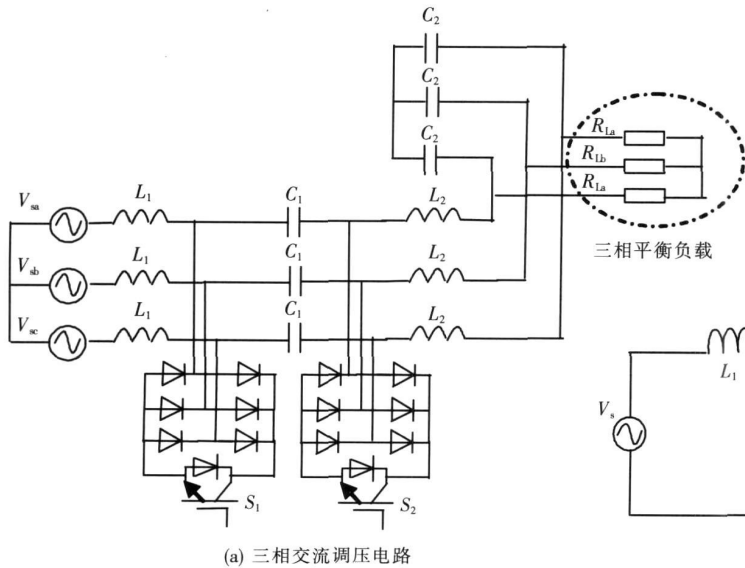


图 3 三相平衡负载交流调压电路及单相等效电路

Fig.3 Three-phase ac regulated source with balance load and its single phase equivalent circuit

1.2 三相不平衡负载

三相不平衡负载,如图 4 所示.在电容  $C_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 的两侧附加二组单相电子开关 ( $S_{1i}, S_{2i}, i = 1, 2, 3$ ),以构成对三相输出电压值的分别调节,同理,  $S_{1i}$  和  $S_{2i}$  开关也是互补导通的,该调压电路的等效单相电路如图 3(b) 所示,等效电路分析同三相平衡负载.所不同的是,开关导通的占空比要根据负载的变化而定,需要分别进行控制.

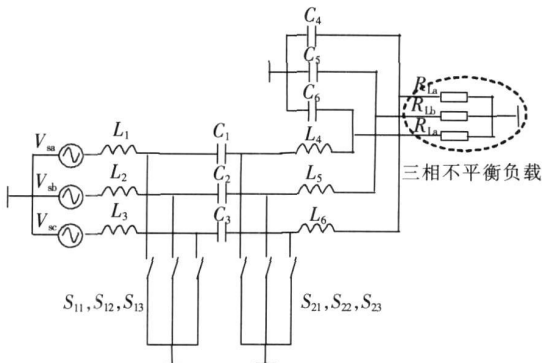


图 4 三相不平衡负载交流调压电路

Fig.4 Three-phase ac regulated source with unbalance load

2 电路的参数选取动态模型及控制系统

对于 50H z 的交流电源, 适当选择电压调节系统的参数和电子开关的频率, 使系统工作频率高于工频的十几到几十倍时, 可以认为系统工作与直流时具有相同或类似情况. 可以借助直流变压的分析方法, 对系统进行分析.

2.1 电路的参数选取

升降压电路的开关工作波形, 以三相平衡负载为例, 同样适用于三相不平衡负载的分析. 设电子开关  $S_1$  和  $S_2$  的工作波形如图 5 所示.

开关周期定为  $T_s$ ,  $S_1$  的导通时间为  $\tau$ ,  $S_1$  开关的占空比为  $D$ , 则有:

$$D = \frac{\tau}{T_s} \tag{1}$$

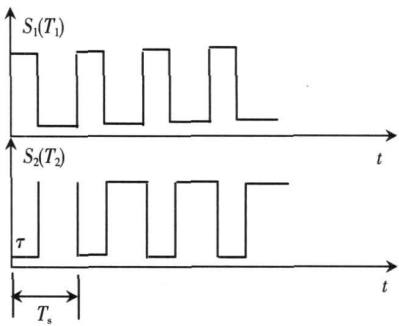


图 5  $S_1, S_2$  的开关波形图  
Fig.5 Waveform of sitch  $S_1$  and  $S_2$

输出电压  $U_0$  和占空比  $D$  之间的关系有:

$$U_0 = \frac{D \cdot u_i}{1 - D} \tag{2}$$

式中:  $u_i$  为输入电压的瞬时值, 输出电压的值将随占空比发生变化  
当  $D = 0.5$  时, 输入电压等于输出电压. 然后根据电容  $C_1, C_2$  两端允许的电压  $u_{C1}, u_{C2}$  的脉动值  $\Delta U_{C1}, \Delta U_{C2}$  和电感电流  $i_{L1}, i_{L2}$  的允许脉动值  $\Delta I_1, \Delta I_2$ , 选取  $L_1, L_2$  及  $C_1, C_2$  的值, 则有:

$$\Delta U_{C1} = \frac{D \cdot I_0}{2f_s C_1}, \tag{3}$$

$$\Delta I_1 = \frac{D \cdot u_i}{2f_s L_1}, \tag{4}$$

$$\Delta I_2 = \frac{D \cdot u_i}{2f_s L_2}, \tag{5}$$

$$\Delta U_{C2} = \frac{D \cdot u_i}{16C_2C_2f_s^2} \tag{6}$$

式中,  $I_0$  为负载电流值;  $f_s$  为开关频率.

2.2 系统的动态模型和控制系统

对于平衡负载和不平衡负载均有类似的单相等效电路, 控制系统也类似这里需要获得单相等效电路的控制模型.

2.2.1 控制系统的动态模型

这里考虑图 3(b) 中电感电流连续的模型, 设图 3(b) 中开关  $S_1$  闭合、 $S_2$  断开时, 电路的状态空间描述为:

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = A_1x(t) + B_1u(t) \\ y(t) = C_1x(t) + E_1u(t). \end{cases} \tag{7}$$

当图 3(b) 中开关  $S_1$  断开、 $S_2$  闭合时, 电路的状态空间描述为:

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = A_2x(t) + B_2u(t) \\ y(t) = C_2x(t) + E_2u(t), \end{cases} \tag{8}$$

定义状态变量的开关周期平均值为:

$$\langle x(t) \rangle_{T_s} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} x(\tau) d\tau \tag{9}$$

其中,  $T_s$  为开关周期.

用状态空间平均法得到状态平均模型有:

$$\begin{cases} \frac{d \langle x(t) \rangle T_s}{dt} = [d(t)A_1 + d'(t)A_2] \langle x(t) \rangle T_s + [d(t)B_1 + d'(t)B_2] \langle u(t) \rangle T_s \\ \langle y(t) \rangle T_s = [d(t)C_1 + d'(t)C_2] \langle x(t) \rangle T_s + [d(t)E_1 + d'(t)E_2] \langle u(t) \rangle T_s \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $d(t)$  为开关  $S_1$  的导通占空比,  $d'(t) = 1 - d(t)$ . 对 (10) 式用扰动法求解小信号线形动态模型为:

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + [(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U]d \\ y(t) = Cx(t) + Eu(t) + [(C_1 - C_2)X + (E_1 - E_2)U]d \end{cases} \quad (11)$$

(11) 式中用了 (12)、(13) 式所示的关系,

$$\begin{cases} X = -A^{-1}BU \\ Y = CX + EU \\ A = DA_1 + D'A_2 \\ B = DB_1 + D'B_2 \\ C = DC_1 + D'C_2 \\ E = DE_1 + D'E_2 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \langle x(t) \rangle T_s = X + x(t) \\ \langle u(t) \rangle T_s = U + u(t) \\ \langle y(t) \rangle T_s = Y + y(t) \\ d(t) = D + d \\ D' = 1 - D \end{cases} \quad (13)$$

对于图 3(a) 所示的 Cuk 电路, 有如下所示的动态模型.

$$\frac{dx(t)}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{D'}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{D}{L_2} & -\frac{1}{L_2} \\ -\frac{D'}{C_1} & \frac{D}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} & 0 & -\frac{1}{R_L C_2} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_2} & 0 \\ \frac{1}{C_1} & \frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \cdot d$$
$$y(t) = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] x(t),$$
$$x = [\dot{i}_{L_1} \quad \dot{i}_{L_2} \quad u_{C_1} \quad u_{C_2}]^T,$$
(14)

(14) 式中,  $X$  为在工作点的各电压电流的值. 对于交流电源来说, 工作点是变化的, 这里考虑输入电压值最大时的控制特性.

2.2.2 控制系统的构成

Cuk 电路中的元件参数如表 1 所示, 电路典型的幅相频率特性 bode 图如图 6 所示, 考虑到 Cuk 电路的控制特性为非最小相位系统, 而且系统的相位裕量很小, 为了获取良好的控制性能, 需要在系统中加入补偿网络, 关于补偿网络的设计这里省略, 可参阅文献 [8]. 控制系统的构成如图 7 所示. 图中  $W_d(s)$  为 Cuk 电路的传递函数. PWM 调制器的工作原理及传递函数如图 8 所示, 为一比例环节.  $\alpha$  为分压系数可根据实际需要进行选择.

表 1 元件参数表  
Table 1 Parameters of the circuit

元件名称	参数
$C_1$	1 $\mu$
$C_2$	50 $\mu$
$L_1$	1 mH
$L_2$	1 mH
RL	40 $\Omega$
fc	1 800 Hz

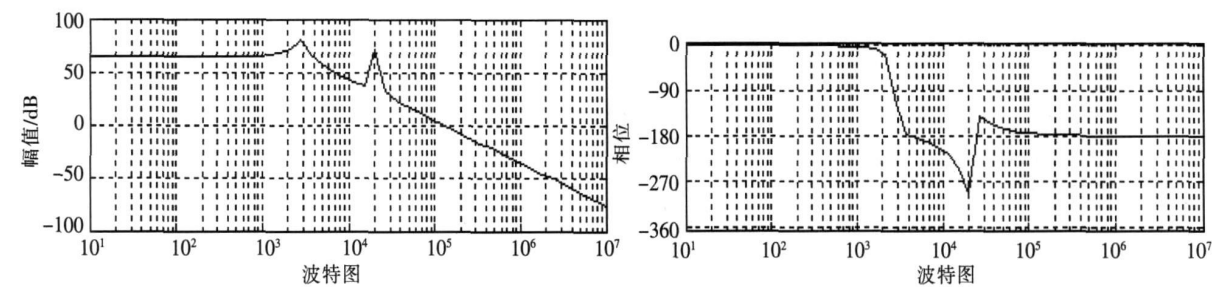


图 6 Cuk 电路的频率特性

Fig.6 Bode plot of the Cuk circuit

3 电源的仿真结果

3.1 仿真结果

按表 1 所示的参数对电路进行仿真, 结果如图 9 所示. 图 9( a)、9( b) 为纯电阻负载下的电压、电流仿真波形, 在  $t = 0.1\text{ s}$  处调节电压给定值, 输出相电压随之发生变化, 对应的相电流也相应增大, 图 9( c)、

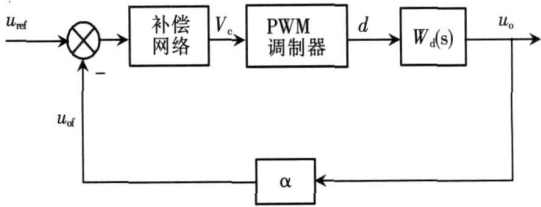


图 7 控制系统的方框图

Fig.7 Blockdiagram of the control system

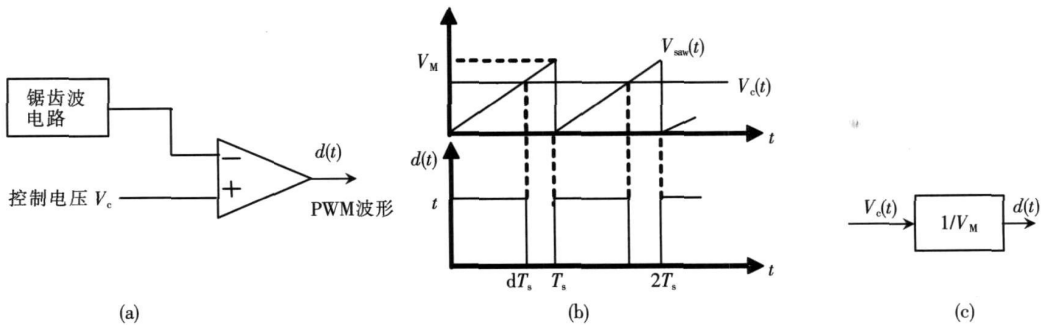


图 8 PWM 调制器的原理及传递函数

Fig.8 The principle of PWM and its transferfunction

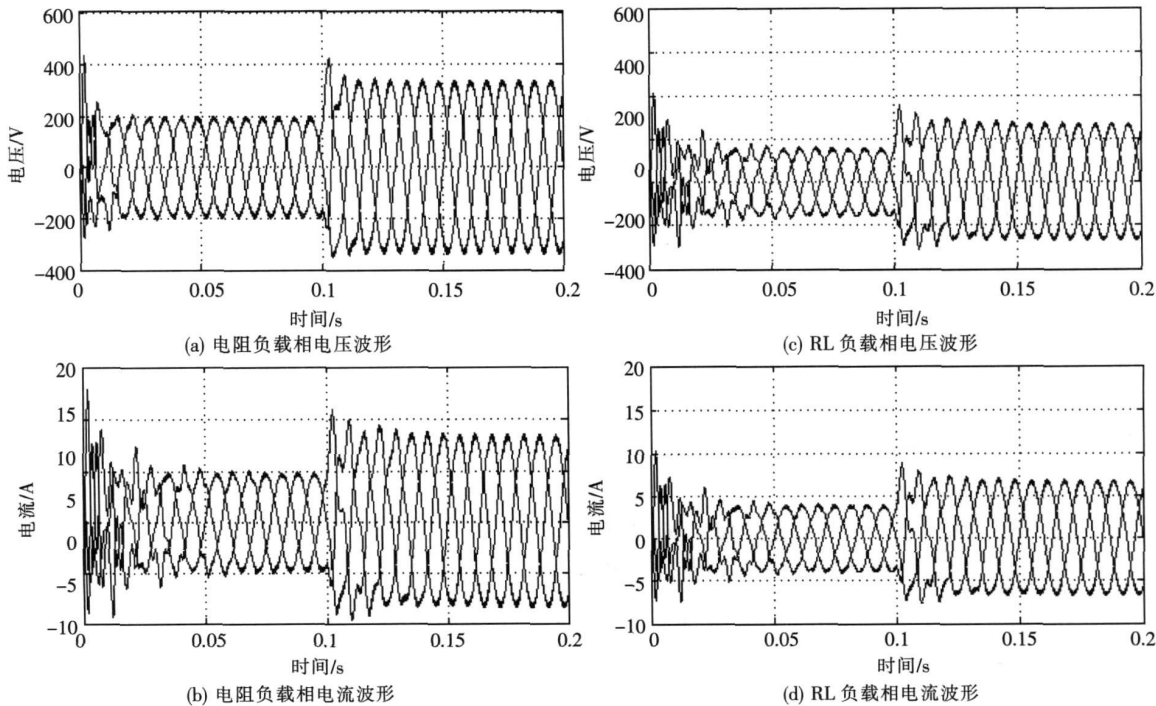


图 9 纯电阻负载和 RL 负载下三相调压、变压电源的仿真波形图

Fig.9 Simulation waveform of the 3-phase ac regulated source with R and R-L load

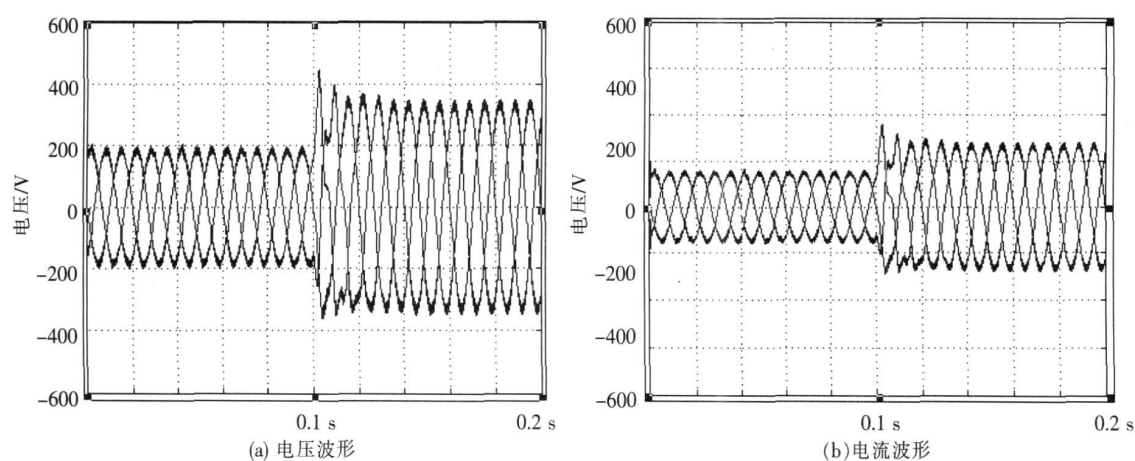


图 10 样机电压电流实验波形

Fig.10 Experimental waveform of output voltage and current in a sample mode

9( d)为 RL负载下的电压、电流仿真波形,在  $t=0.1\text{ s}$ 处,调节电压给定值,输出相电压、相电流也随之有相应的改变.

3.2 实验结果

在样机中取  $R_L=50\text{ }\Omega$ ,  $L_1=L_2=2\text{ mH}$ ,  $C_1=20\text{ }\mu\text{F}$ ,  $C_2=100\text{ }\mu\text{F}$ ,样机额定功率  $3\text{ }000\text{ W}$ ,输入为  $3\text{ 相 }50\text{ Hz}$  工频电源,输入给定发生阶跃变化时,输出电压由  $132\text{ V}$  跃变到  $220\text{ V}$ .

4 结论

将直流调压技术用于交流三相电压的调节和稳压是一种新的尝试,是直流电压变换电路使用领域的扩展.与使用其他方法的交流调压稳压电路相比它具有控制电路的构成并不十分复杂、对电源产生的谐波少、对于开关器件的要求不高等优点;与选用其他类型的 DC-DC 电路相比,使用 Cuk 电路具有电压调节性能好、电压调节范围大、而且 Cuk 电路使用的开关器件个数不多,尤其对平衡的三相负载.另外,还可以减少负载端的接线数,这也是考虑使用 Cuk 电路的主要原因.从 Cuk 电路样机的实验结果看,和预期的结果基本符合.

[参考文献] (References)

[ 1 ] Fang Z P, Chen L, Zhang F. Simple topologies of PWM AC-AC converters [ J]. IEEE Power Electronics Letters, 2003, 1( 1): 10-13.

[ 2 ] Hétaps SM, Naden M. Automatic voltage regulator using an AC voltage-voltage converter [ J]. IEEE Trans Ind Application, 2000, 36: 33-38, Jan /Feb.

[ 3 ] Vilathgamuwa DM, Loh PC, Li Y W. Protection of micro grids during utility voltage sags [ J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53( 5): 1 427-1 436.

[ 4 ] Rodriguez P, Timbus A V, Teodorescu R, et al. Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults [ J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2007, 54( 5): 2 583-2 592.

[ 5 ] 张超华, 汤雨, 谢少军. 基于 Buck-Boost 的 AC-AC 变换器设计 [ J]. 电工技术学报, 2007, 22( 8): 52-56.

Zhang Chao-hua, Tang Yu, Xie Shao-jun. Design of AC regulator based on buck-boost converter [ J]. Transactions of China Electro-Technical Society, 2007, 22( 8): 52-56 ( in Chinese).

[ 6 ] 陈道炼, 李磊, 张海涛, 等. 单极性移相控制电压源高频交流环节 AC/AC 变换器研究 [ J]. 中国电机工程学报, 2003, 23( 11): 29-32.

Chen Dao-lian, Li Lei, Zhang Hai-tao, et al. Research on the unipolarity phase-shifted controlled voltage mode AC/AC converters with high frequency AC link [ J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23( 11): 29-32 ( in Chinese).

[ 7 ] 刘竞成. 交流调速系统 [ M ]. 上海: 上海交通大学出版社, 1984.

Liu Jing-cheng. AC Regulate Speed System [ M ]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1984. ( in Chinese).

[ 8 ] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制 [ M ]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

Xu De-hong. Modeling and Control Power Electronics System [ M ]. Beijing: Mechanism Industry Press, 2007. ( in Chinese).

[责任编辑: 刘 健]