

# 三相四线系统并联电能质量 补偿器的新型控制方法

戴宁怡<sup>1</sup>, 黄民聪<sup>1,2</sup>, 韩英铎<sup>1,2</sup>

(1. 澳门大学 科技学院, 澳门; 2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

**摘要:** 控制技术是应用逆变器在配电网实现电能质量补偿的关键。提出一种基于参考电压矢量平移的新型三维空间矢量调制方法, 用来控制三电平三桥臂中点引出式逆变器, 实现三相四线系统中的并联电能质量补偿。与三相三线系统中的两维空间矢量调制不同, 这种新型三维空间矢量调制方法基于  $\alpha$ - $\beta$ -0 变换, 利用零序分量补偿中线电流。所提出的控制方法用在三相四线系统中的并联电能质量补偿器中, Matlab 下的仿真结果表明这一控制方法可以使并联补偿器同时完成抑制谐波、补偿无功和中线电流的综合功能。通过与三维  $\alpha$ - $\beta$ -0 滞环控制方法补偿效果的比较, 证明三维空间矢量控制方法可以在较低的开关频率下达到更好的补偿效果。

**关键词:** 电能质量; 三电平逆变器; 三相四线系统; 三维空间矢量调制

**中图分类号:** TM 714.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2003)06-0016-05

改善配电网供电质量是电力系统的重要课题之一, 大多数的电能质量调节器都以 PWM 逆变器为核心电路<sup>[1]</sup>。过去, 有关 PWM 逆变器控制技术的研究都集中在三相三线系统中, 随着用户电力技术的发展, 应用于三相四线系统中的 UPS 和电能质量补偿器将会得到越来越多的重视。对于传统三相三线系统中的 NPC 三电平逆变器, 只要添加一根中线连接直流侧的中点与系统中线, 就可以应用到三相四线系统中<sup>[2,3]</sup>。

本文针对中点引出式三电平逆变器, 提出一种新型的三维空间矢量脉宽调制法, 用来控制三相四线系统中的并联电能质量补偿器。首先介绍  $\alpha$ - $\beta$ -0 变换下三维空间矢量的分布, 随后详细分析所提出的新型三维空间矢量调制方法, 最后将所提出的三维空间矢量调制方法用在一个三相四线系统的并

联补偿器中, 在 Matlab 中仿真, 实现对三相谐波、中线电流和无功功率的补偿。通过与三维  $\alpha$ - $\beta$ -0 滞环控制方法补偿效果的比较, 证明所提出三维空间矢量控制方法在较低的开关频率下就可得到很好的补偿效果。

## 1 三维空间的电压矢量

图 1 为中点引出式三电平逆变器。

由图 1 可定义开关函数为

$$S_j = \begin{cases} 1 & V_{1a} \text{ 和 } V_{2a} \text{ 导通} \\ 0 & V_{2a} \text{ 和 } V_{3a} \text{ 导通} \\ -1 & V_{3a} \text{ 和 } V_{4a} \text{ 导通} \end{cases} \quad j = a, b, c \quad (1)$$

假定  $U_{dc1} = U_{dc2} = U_{dc}$ , 此时, 每一桥臂的输出电压仍可以表示为

$$U_o = U_{dr} S_j \quad j = a, b, c \quad (2)$$

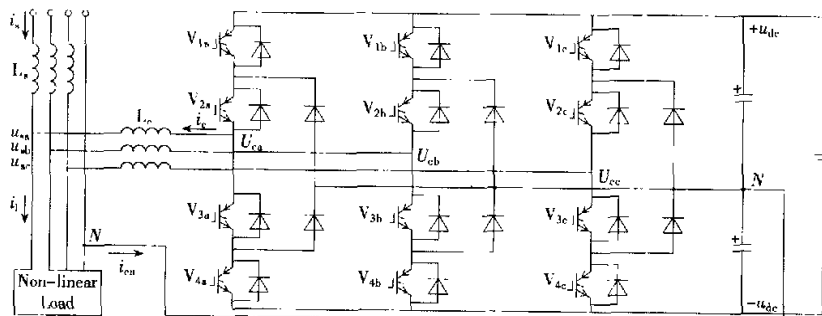


图 1 使用三相半桥逆变器的并联补偿器

Fig.1 The center-split inverter as a power quality compensator

收稿日期: 2003-03-04

三维  $\alpha$ - $\beta$ -0 坐标系中的瞬时电压矢量可以利用公式(3)给出的  $\alpha$ - $\beta$ -0 变换得到:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$\alpha$ - $\beta$ -0 坐标下的瞬时电压矢量可以表示为<sup>[3]</sup>

$$u = U_{dc} \left[ \sqrt{\frac{2}{3}} S_\alpha n_\alpha + \frac{1}{\sqrt{2}} S_\beta n_\beta + \frac{1}{\sqrt{3}} S_0 n_0 \right] \quad (4)$$

式中  $S_\alpha = S_a - S_b - S_c/2$ ;  $S_\beta = S_b - S_c$ ;  $S_0 = S_a + S_b + S_c$ 。

在中点引出式两电平逆变器中,开关函数  $S$  只可以取“1”或“-1”,因而只有 8 种开关组合对应于 8 个空间电压矢量。表 1 中列出了两电平电压矢量在  $a$ - $b$ - $c$  坐标及经过  $\alpha$ - $\beta$ -0 变换后的参数。在如图 2 所示的三维视图中,可以更清楚地看出两电平电压矢量的空间分布。其中矢量  $U_2, U_4, U_6$  和  $U_1, U_3, U_5$  分别处于不同水平面上,而 2 个零矢量分别指向零轴的正方向和负方向。图 3 是三维空间两电平电压矢量在  $\alpha$ - $\beta$  平面上的分布,可以看出其与传统二维空间电压矢量在平面上的分布是一样的<sup>[4]</sup>。

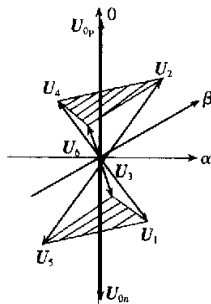


图 2 三维空间的电压矢量分布

Fig.2 The map of 3D voltage vectors

表 1 两电平三维空间电压  
Tab.1 The parameters of 2-level 3DSVM voltage vectors

电压矢量	$S_a$	$S_b$	$S_c$	$S_\alpha$	$S_\beta$	$S_0$
$U_1$	1	-1	-1	2	0	-1
$U_2$	1	1	-1	1	2	1
$U_3$	-1	1	-1	-1	2	-1
$U_4$	-1	1	1	-2	0	1
$U_5$	-1	-1	1	-1	-2	-1
$U_6$	1	-1	1	1	-2	1
$U_{0p}$	1	1	1	0	0	3
$U_{0n}$	-1	-1	-1	0	0	-3

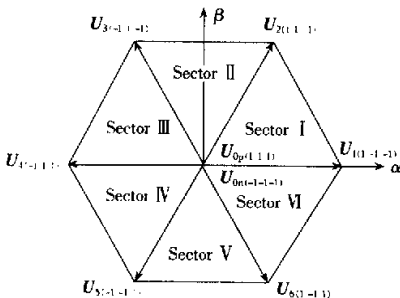


图 3 电压矢量在  $\alpha$ - $\beta$  平面上的分布

Fig.3 The allocation of voltage vector in  $\alpha$ - $\beta$  frame

在三电平逆变器中,开关函数  $S$  可取“1”,“-1”或“0”,对应于 27 种开关状态有 27 个不同的电压矢量。这 27 个电压矢量可分为四类:零矢量、小矢量、中矢量和大大矢量。表 2~5 分别列出了零矢量、小矢量、中矢量和大大矢量在  $a$ - $b$ - $c$  和  $\alpha$ - $\beta$ -0 坐标下的参数。图 4,5 分别是  $\alpha$ - $\beta$ -0 坐标

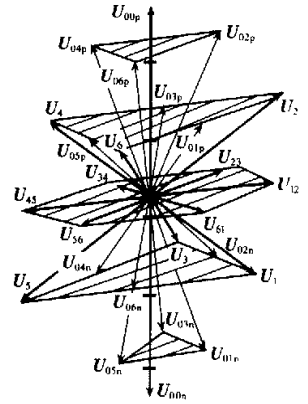


图 4 三维  $\alpha$ - $\beta$ -0 坐标下三电平电压矢量的分布

Fig.4 The allocation of 3-level 3-Dimensional spacevectors in  $\alpha$ - $\beta$ -0 frame

表 2 零矢量参数

Tab.2 The parameters of zero vectors

电压矢量	$S_a$	$S_b$	$S_c$	$S_\alpha$	$S_\beta$	$S_0$
$U_{0n0}$	0	0	0	0	0	0
$U_{00p}$	1	1	1	0	0	3
$U_{00n}$	-1	-1	-1	0	0	-3

表 3 小矢量参数

Tab.3 The parameters of small vectors

电压矢量	$S_a$	$S_b$	$S_c$	$S_\alpha$	$S_\beta$	$S_0$
$U_{01p}$	1	0	0	1.0	0	1
$U_{01n}$	0	-1	-1	1.0	0	-2
$U_{02p}$	1	1	0	0.5	1	2
$U_{02n}$	0	0	-1	0.5	1	-1
$U_{03p}$	0	1	0	-0.5	1	1
$U_{03n}$	-1	0	-1	-0.5	1	-2
$U_{04p}$	0	1	1	-1.0	0	2
$U_{04n}$	-1	0	0	-1.0	0	-1
$U_{05p}$	0	0	1	-0.5	-1	1
$U_{05n}$	-1	-1	0	-0.5	-1	-2
$U_{06p}$	1	0	1	0.5	-1	2
$U_{06n}$	0	-1	0	0.5	-1	-1

表 4 中矢量参数

Tab.4 The parameters of medium vectors

电压矢量	$S_a$	$S_b$	$S_c$	$S_\alpha$	$S_\beta$	$S_0$
$U_{12}$	1	0	-1	1.5	1	0
$U_{23}$	0	1	-1	0.0	2	0
$U_{34}$	-1	1	0	-1.5	1	0
$U_{45}$	-1	0	1	-1.5	-1	0
$U_{56}$	0	-1	1	0.0	-2	0
$U_{61}$	1	-1	0	1.5	-1	0

表 5 大大矢量参数

Tab.5 The parameters of large vectors

电压矢量	$S_a$	$S_b$	$S_c$	$S_\alpha$	$S_\beta$	$S_0$
$U_1$	1	-1	-1	2	0	-1
$U_2$	1	1	-1	1	2	1
$U_3$	-1	1	-1	-1	2	-1
$U_4$	-1	1	1	-2	0	1
$U_5$	-1	-1	1	-1	-2	-1
$U_6$	1	-1	1	1	-2	1



作用效果在平均伏秒意义上与参考电压矢量相等。本文所提出的三电平三维空间矢量调制方法,希望将三电平的矢量调制化简到与两电平等价的小六边形区域中,用两电平空间矢量调制的方法确定与参考电压矢量相邻的开关矢量及其作用时间。

要化简三电平空间矢量调制,首先要根据参考电压矢量在  $\alpha-\beta$  空间的位置,选择一个小六边形区域。如图 6(a)所示,相邻的小六边形区域存在重叠的部分,在重叠区域,可以任意选择 2 个小六边形中的一个,也可以选择图 6(b)所示的划分方法。

然后根据所选的区域,将参考电压矢量  $U_{ref}$  分解为平移矢量和两电平参考电压矢量  $U'_{ref}$  两部分,其中平移矢量的顶点即是所选定小六边形区域的中心点,参考电压矢量减去平移矢量得到的就是新的两电平参考矢量,新的两电平参考矢量以小六边形区域的中心点为起点。图 8 中以参考电压矢量处于图 6(a)中编号为 1 的小六边形区域为例,给出  $\alpha-\beta$  坐标下电压参考矢量分解示意。图 9 所示的是三维  $\alpha-\beta-0$  坐标下的参考矢量分解示意图。得到新的两电平参考矢量后,就可以利用两电平三维空间矢量调制方法在小六边形区域中选择与参考电压矢量相邻的开关矢量,并计算其作用时间,从而得到实现三电平空间矢量调制所需要的时间参数。

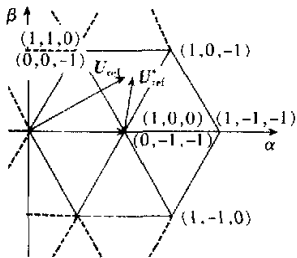


图 8  $\alpha-\beta$  平面上参考电压的分解

Fig.8 The decomposition of reference voltage in  $\alpha-\beta$  frame

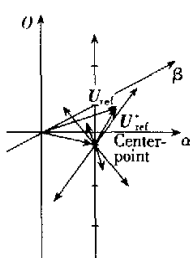


图 9  $\alpha-\beta-0$  三维空间中参考电压矢量分解

Fig.9 The decomposition of reference voltage in  $\alpha-\beta-0$  frame

#### 4 仿真结果

根据图 1 所示的系统结构,在 Matlab 中仿真。利用三相四线系统中的瞬时无功理论<sup>[7]</sup>计算参考电流,电流参考值与实际负载电流之间的差就是要补偿的电流信号,称为跟踪电流。将跟踪电流与实际注入系统的补偿电流进行比较,就可以得到控制逆变器动作的电流信号,并进一步求出参考电压矢量。随后利用所提出的三维空间矢量调制方法控制中点引出式三相并联逆变器补偿电源侧电流谐波和中线电流,验证所提出方法的有效性,仿真中开关频率控制为 5 kHz。

图 10 所示是负载侧的电流波形 ( $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}, i_{Ln}$ ),图 11 是采用空间矢量控制补偿以后的电源侧电流波形 ( $i_{Sa}, i_{Sb}, i_{Sc}, i_{SN}$ )。比较图 10 和图 11,可以看出三相电流谐波大为减少,中线电流也得到了补偿。图 12 所示是使用二维  $\alpha-\beta-0$  滞环控制方法<sup>[2]</sup>在 10 kHz 开关频率下得到的补偿结果(图中  $i'_{Sa}, i'_{Sb}, i'_{Sc}, i'_{SN}$  分别为 a,b,c 相电流及中线电流)。表 7 是分别运用两种控制方法补偿前后三相电流的谐波含量(THD)。比较图 11 和图 12 可以看出应用三维空间矢量补偿后波形更为平滑,谐波含量也更小。

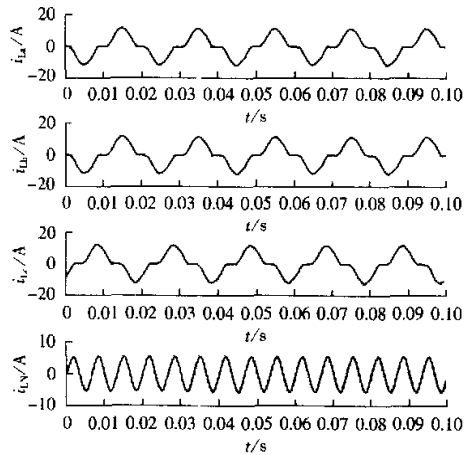


图 10 负载侧的电流  
Fig.10 The load current

表 7 电流谐波含量比较  
Tab.7 The current THD value

电 流	THD			%
	a	b	c	
$i_L$	34.20	34.17	34.17	
$i_s$	3.38	3.34	3.34	
$i'_s$	4.38	4.46	4.40	

#### 5 结论

本文提出了一种可以应用于三相四线系统中并联电能质量补偿器的三电平三维空间矢量调制方法。这种新型控制方法,通过对于参考电压矢量的平移与分解,将三电平问题化简到一个两电平三维矢量分布空间,利用两电平三维空间矢量控制方法求解开关矢量作用时间,大大简化了三电平空间矢量调制的算法。应用该方法控制三电平中点引出式逆变器,可以实现同时补偿三相四线系统中电流谐波、无功和中线电流。通过与三维  $\alpha-\beta-0$  滞环控制方法比较,证明该控制方法有开关频率低,补偿效果好的优点。

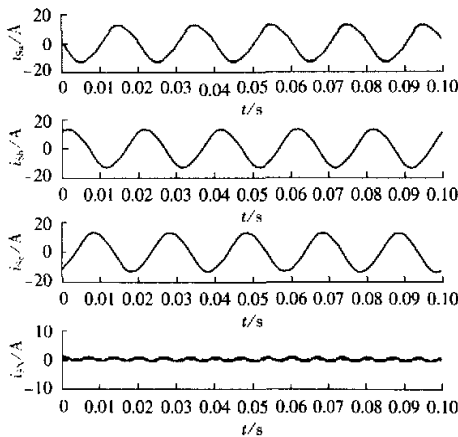


图11 补偿后电源侧电流(5 kHz空间矢量控制)  
Fig.11 The source current after compensation  
by 5 kHz 3DSVM

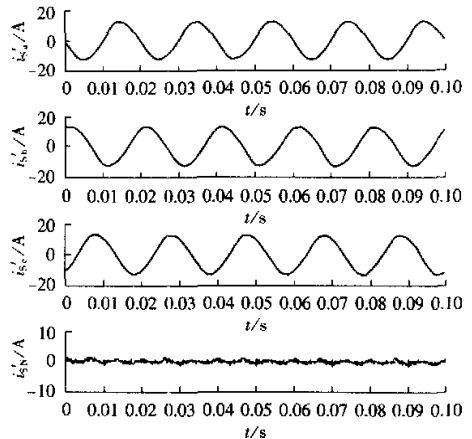


图12 补偿后电源侧电流(10 kHz  $\alpha$ - $\beta$ -0 滞环控制)  
Fig.12 The source current after compensation  
by 10 kHz 3DSCH

### 参考文献:

- [1] 韩郁,詹长江,赵良炳,等.三电平并联型电能质量调节器的控制技术[J].清华大学学报,2000,40(3):40-43. HAN Yu,ZHAN Chang-jiang,ZHAO Liang-bin, et al. Control of tri-level shunt power quality conditioner[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2000,40(3):40-43.
- [2] WONG Man-chung,ZHAO Zheng-yi,HAN Ying-duo, et al. Three-dimensional pulse-width modulation technique in three-level power inverters for three-phase four-wired system[J]. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2001, 16(3):418-427.
- [3] MAURICIO A, JURGEN H, KLEMENS H. Three-phase four-wire shunt active filter control strategies [J]. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 1997, 12(2):311-318.
- [4] JOACHIM H. Pulse-width modulation —— A survey[J]. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 1992, 39(5): 410-420.
- [5] SEO J H, CHOI C H, HYUN D S. A new simplified space-vector PWM method for three-level inverter[J]. *IEEE*

- Trans. on Power Electronics*, 2001, 16(4):545-550.
- [6] 宋强.大容量多电平逆变器的控制方法及基于IGCT的系统设计[D].北京:清华大学,2001. SONG Qiang. Modulation and control strategies and IGCT-based design for high-power multilevel inverters [D]. Beijing:Tsinghua University, 2001.
  - [7] PENG Fang-zheng, OTT G W Jr, ADAMS D J. Harmonics and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems [J]. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 1998, 13(6):1174-1181.

(责任编辑:柏英武)

### 作者简介:

戴宁怡(1979-),女,江苏南京人,硕士研究生,主要从事电力电子,电能质量补偿方面的研究工作;  
黄民聪(1969-),男,讲师,博士研究生,主要从事电能质量,DS-Unicon的研究工作;  
韩英铎(1938-),男,辽宁沈阳人,中国工程院院士,教授,研究方向为电力系统自动化以及电力电子技术在电力系统中的应用。

## Control of shunt power quality compensators in 3-phase 4-wire system

DAI Ning-yi<sup>1</sup>, HUANG Min-cong<sup>1,2</sup>, HAN Ying-duo<sup>1,2</sup>

(1. University of Macau, Macau, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Control technique is needed to improve the compensation of power quality with converters. A 3-Dimensional Space Vector PWM(3DSVM) control technique for 3-Level 3-Leg Center-Split Inverter is proposed. Different from the conventional 2-Dimensional SVM control technique, it is based on the  $\alpha$ - $\beta$ -0 transformation. The zero-sequence component is considered to compensate the neutral current. The proposed control technique is applied to a shunt power-quality compensator in three-phase four-wire system. The results of computer simulations with Matlab show that it can compensate the harmonics, reactive currents and imbalance simultaneously. The proposed control technique is also compared with 3-Dimensional Sign Cubic Hysteresis control technique. The simulation results show that the 3DSVM control has better performance in shunt power-quality compensation.

**Key words:** power quality; 3-level center-split structure inverter; three-phase four-wired system; 3DSVM

# 三相四线系统并联电能质量补偿器的新型控制方法

作者: 戴宁怡, 黄民聪, 韩英铎  
作者单位: 戴宁怡(澳门大学科技学院, 澳门), 黄民聪, 韩英铎(澳门大学科技学院, 澳门;清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京, 100084)  
刊名: 电力自动化设备 ISTIC EI PKU  
英文刊名: ELECTRIC POWER AUTOMATION EQUIPMENT  
年, 卷(期): 2003, 23 (6)  
被引用次数: 7次

## 参考文献(7条)

1. 韩郁;詹长江;赵良炳 三电平并联型电能质量调节器的控制技术研究[期刊论文]-清华大学学报(自然科学版) 2000(03)
2. Wong Man-Chung;ZHAO Zheng-yi;HAN Ying-duo Three-dimensional pulse-width modulation technique in three-level power inverters for three-phase four-wired system[外文期刊] 2001(03)
3. MAURICIO A;JURGEN H;KLEMENS H Three-phase four-wire shunt active filter control strategies[外文期刊] 1997(02)
4. JOACHIM H Pulse-width modulation -- A survey[外文期刊] 1992(05)
5. Seo J H;CHOI C H;HYUN D S A new simplified space-vector PWM method for three-level inverter[外文期刊] 2001(04)
6. 宋强 大容量多电平逆变器的控制方法及其系统设计[学位论文] 2001
7. Peng Fang-zheng;OTT G W Jr;ADAMS D J Harmonics and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems[外文期刊] 1998(06)

## 本文读者也读过(4条)

1. 戴宁怡, 黄民聪, 唐净, 韩英铎 新型三维空间矢量脉宽调制在三相四线系统中的应用[期刊论文]-电力系统自动化 2003, 27(17)
2. 张建良, 谭国俊, 韩耀飞, ZHANG Jian-liang, TAN Guo-jun, HAN Yao-fei 三电平有源电力滤波器实验研究[期刊论文]-电力电子技术2009, 43(5)
3. 韩郁, 詹长江, 赵良炳, 黄民聪, HAN Yu, ZHAN Changjiang, ZHAO Liangbing, WONG Manchung 三电平并联型电能质量调节器的控制技术研究[期刊论文]-清华大学学报(自然科学版) 2000, 40(3)
4. 陈东华, 吴睿, 谢少军, 周波, CHEN Dong-hua, WU Rui, XIE Shao-jun, ZHOU Bo 基于FPGA的三相四线有源滤波器的电流控制方案[期刊论文]-电力系统自动化2006, 30(3)

## 引证文献(7条)

1. 张培远, 黄落成 预测电流控制在三电平三相四桥臂有源电力滤波器中的应用[期刊论文]-低压电器 2012(10)
2. 伏祥运, 赵明, 姚钢 一种新型的中性线电流补偿器[期刊论文]-电力自动化设备 2010(5)
3. 陆耀强, 戴宁怡, 黄民聪 直流电压自平衡新型三电平准谐振逆变器[期刊论文]-电工电能新技术 2010(4)
4. 陈继侠, 陈晓东, 孙辉 电能质量调节器的改进无差拍控制[期刊论文]-高压电器 2005(3)
5. 陈继侠, 孙辉, 陈晓东 电能质量调节器的改进无差拍控制[期刊论文]-电力自动化设备 2004(8)
6. 张秀峰 高速铁路同相AT牵引供电系统研究[学位论文]博士 2006
7. 钟洪浩 新型混合有源电力滤波器研究[学位论文]博士 2005

引用本文格式：[戴宁怡, 黄民聪, 韩英铎](#) [三相四线系统并联电能质量补偿器的新型控制方法](#)[期刊论文]-[电力自动化设备](#) 2003(6)