

# PWM 静止无功补偿器提高系统阻尼的研究

王琦<sup>1,2</sup>, 李天然<sup>1</sup>, 吴启涛<sup>2</sup>, 纪延超<sup>2</sup>

(11 南京师范大学电气与电子工程学院, 江苏 南京 210042; 21 哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 长距离大功率输电系统, 在因故障引起的暂态过程中, 功角振荡衰减得很慢, 有时甚至不衰减, 主要原因是系统本身缺乏足够的阻尼。本文从理论上论证了一种基于 PWM 的静止无功补偿器 (PSVC) 能够提高系统阻尼特性的原理; 并利用等面积法则证明了 PSVC 采用频率作为控制信号时具有最佳的阻尼效果, 给出了 PSVC 的模型; 最后通过仿真计算所得的结果, 验证 PSVC 提高系统阻尼特性的效果。

**关键词:** 静止无功补偿器; 阻尼特性; 电力系统暂态稳定

**中图分类号:** TM 714 3 **文献标识码:** A **文章编号:** 100324897(2003)1020018205

## 1 引言

静止无功补偿器被广泛应用于电力系统中, 它是灵活交流输电系统的一个重要组成部分, 对改善电网电压质量, 提高系统暂态稳定性起着越来越重要的作用。随着电力电子技术的迅速发展, 基于自关断开关器件应用到静止无功补偿器上。1994 年, Hua Jin 等人在前人基础上提出了一种新型的 PWM 静止动态无功补偿器<sup>[1]</sup>, 这就是我们所要研究的新型静止无功补偿器 PSVC。它用自关断开关取代了晶闸管来控制电抗器的等效电抗。本文提出了一种基于新型静止无功补偿器 PSVC 抑制系统低频振荡, 提高系统暂态稳定性的方法。

以往我们都采用电力系统稳定器 PSS, 在电压偏差外再增加一个辅助反馈变量, 这样, 通过对发电机励磁实行控制就可增加系统的阻尼系数。但是本文所研究的低频振荡频率在 1Hz 左右。在大多数情况下, PSS 对于这种低频振荡不具有有效的衰减作用。

通过分析研究表明, 在对静止无功补偿器 PSVC 引入母线电压频率的偏差作为辅助控制信号后, 在新的控制规律作用下, PSVC 还将会对提高系统的阻尼特性作出贡献。

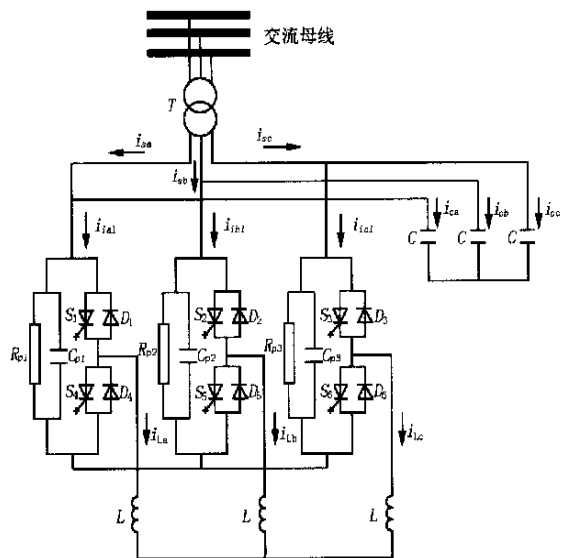
### 1.1 PSVC 的工作原理分析

PSVC 的结构见图 1(a), 开关  $S_{1,2,3}$  周期性地接通和关断电感与三相交流系统, 而辅助开关  $S_{4,5,6}$  在  $S_{1,2,3}$  关断期间允许电感电流续流, 因此  $S_{1,2,3}$  与  $S_{4,5,6}$  导通和关断的关系为:  $S_{1,2,3} = S_{4,5,6}$ 。

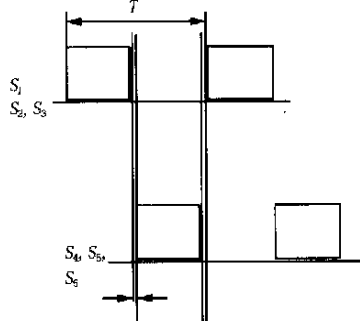
若不考虑谐波, PSVC 的等效电抗为:

$$X_b = X_{lm} \omega^2 \quad (1)$$

总体来说, PSVC 与传统无功补偿器(如: TCR)



(a) PSVC 的结构图



(b) PSVC 的触发信号图

图 1 PSVC 的原理图

Fig 1 Principle diagram of PSVC

相比, 具有如下优点:

(1) 结构简单。

(2) 控制方案容易实现。它不需与主线路同步, 可在开环条件下运行, 被控电抗器的等效电抗通过

开关的占空比来调节, 并且可在很宽的范围内变化。

(3) 由于补偿器的开关频率高, 所以响应速度快, 并且不会产生低次谐波, 高次谐波可以通过产生超前无功的电容和变压器的漏抗滤除, 不需额外的滤波器。

## 2 PSVC 提高系统阻尼

典型地, 当发电机组通过远距离输电线与无限大系统连接时, 即使一个小扰动, 都会使得整个原动机发电机组的转子相对于电力系统发生摇摆, 尤其是在重负荷情况下的互联电力系统中。这种电磁振荡的自然振荡频率一般只有几赫兹, 甚至更小, 而且由于衰减率较小, 该振荡可能近似等幅地持续几分钟后消失, 也可能慢慢扩散, 直到系统解列。

由于调速器的反应速度比较慢, 其对系统振荡的影响很小, 另外 PSVC 优于其他无功补偿器的主要优点是, 它能够迅速改变无功输出, 因此机械功率  $P_m$  的影响可忽略不计, 那么 PSVC 提高系统阻尼的功能也只有靠控制传输功率  $P_e$  来实现了。

根据等面积准则, 为了实现系统的动态稳定性, 加速面积应该随着转子角的振荡不断减小, 即当  $D$  增加 ( $\Delta X > 0$ ) 时, 抬升  $P-D$  曲线, 如图 2(a) 所示, 当  $D$  减小 ( $\Delta X < 0$ ) 时, 降低功角特性, 如图 2(b) 所示,  $z$  最终使得振荡系统趋于一稳定值  $D$  而不是以恒定角度振荡。

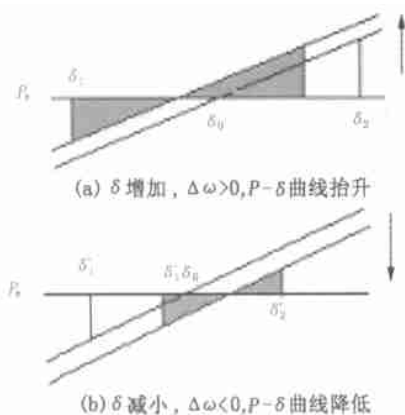


图 2 功率特性的基本控制

Fig 2 Basic control of the characteristic of power

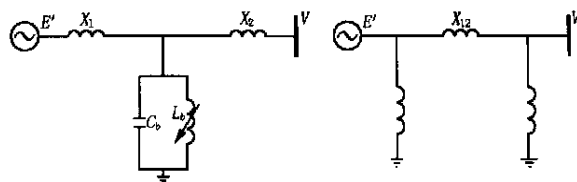
### 2.1 PSVC 改变系统功角特性

在图 3(a) 单机无穷大系统中, 发电机采用经典二阶模型, 即  $E' \approx$  常数, PSVC 是一个可连续调节电纳  $B_{psvc}$  的无功补偿器, 其中  $x_1$  为线路阻抗与发电机暂态电抗  $x_d'$  之和。当 PSVC 提供无功给系统时,  $B_{psvc}$  容性, 即  $B_{psvc} > 0$ ; 当 PSVC 从系统吸收无

功时,  $B_{psvc}$  感性, 即  $B_{psvc} < 0$ 。

用星—三角变换可得等效电路图 3(b)。此时系统从发电机到无限大系统的转移电抗由未并 PSVC 时  $x_1 + x_2$  变为  $x_{12}$ , 其值为:

$$x_{12} = x_1 + x_2 + x_3 + x_1 x_2 \ddot{O}x_b \quad (2)$$



(a) 单机无穷大系统结构图

(b)  $\pi$  型等效电路图

图 3 单机无穷大系统及 P 型等效电路

Fig 3 Single-unit infinite system and P type equivalent circuit

则当 PSVC 补偿器工作时, 系统的功角特性为:

$$P_e = \frac{E' U}{x_1 + x_2 + x_1 x_2 \ddot{O}x_b} \sin D \quad (3)$$

其中, PSVC 容性, 即  $B_{psvc} > 0$  时, 系统的功角特性被 PSVC 抬升, 向系统发送无功, PSVC 感性, 即  $B_{psvc} < 0$  时, 系统的  $P-D$  曲线被降低, 吸收系统无功。如图 4 所示。

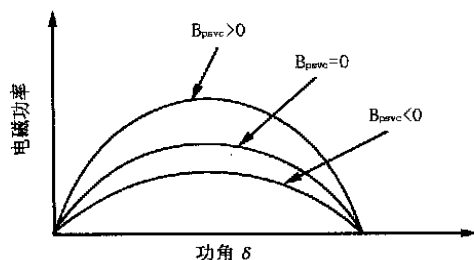


图 4 PSVC 对传输特性的影响

Fig 4 Influence of the characteristic of transmission with PSVC

显而易见, PSVC 输出  $B_{psvc}$  可以改变系统的功角特性。

由上节可知, 要想稳定系统, 提高系统动态稳定性, 必需随着系统的要求控制 (抬升或降低) 传输功率特性曲线  $P_e-D$ 。本节又指出, 根据功角特性, 传输功率  $P_e$  的改变是通过无功补偿器输出的连续变化实现的。当  $B_{psvc} > 0$  时, 功角特性抬升, 当  $B_{psvc} < 0$  时, 功角特性降低。归根结底, PSVC 对低频振荡的抑制作用是由  $B_{psvc}$  所决定的, 那么对于 PSVC 改善系统阻尼的研究可以通过分析系统接入 PSVC 后, PSVC 输出量  $B_{psvc}$  的动态变化过程来完成。尤其是在高输电量区域互联网系统中, PSVC 抑制系

统低频振荡的能力得到大大地提高,这是因为随着电压等级提高,  $P_e - D$  曲线的变化幅度将增大,导致 PSVC 的补偿效果更加显著。

## 2.2 \$X\$ 辅助控制

PSVC 的输出  $B_{psvc}$  决定了 PSVC 改善系统阻尼的作用。这样就引入了一个附加控制量,根据系统的振荡情况控制  $B_{psvc}$  的大小,一般来说,可以采用多种不同的附加控制信号,如有功、无功、电流及频率等。研究和计算表明,只有采用频率作为其附加控制信号才能产生最佳阻尼效果。

这里,我们采用  $X$  作为辅助控制量控制 PSVC 的输出,可得:

$$X_b = K \cdot X \quad (4)$$

$K$  为控制增益,一待定常数。

将发电机的经典二阶模型写成小扰动方程的形式:

$$T_J p^2 \delta + D p \delta + X_0 P_e = 0 \quad (5)$$

式中  $D$  为系统的自然阻尼功率系数,一般情况下其值很小,可忽略不计;  $p$  为  $d/dt$ ;  $P_e$  是传输功率,可由功角特性得出。

在功角特性式(3)中,  $P_e$  是容抗  $X_b$  和功角  $D$  的函数(不考虑调节励磁),故式(3)可写成:

$$P_e = f(X_b) g(D) \quad (6)$$

用小扰动  $X_b = X_{b0} + \Delta X_b$  和  $D = D_0 + \Delta D$  代入上式,可得功率  $P_e$  的偏差量为:

$$\Delta P_e = f(X_{b0}) g'(D) \Delta D + g(D) f'(X_{b0}) \Delta X_b + m \Delta D + n \Delta X_b \quad (7)$$

其中:

$$m = f(X_{b0}) g'(D) = \frac{E U}{X_1 + X_2 + X_1 X_2 \Delta X_{b0}} \cos D$$

$$n = g(D) f'(X_{b0}) = \frac{E U X_1 X_2}{[(X_1 + X_2) X_{b0} + X_1 X_2]^2} \sin D$$

$D$

将式(4)和式(7)同时代入到式(5)中,可得 PSVC 加上辅助控制信号后,发电机的二阶模型:

$$T_J p^2 \delta + (D + X_0 n K) p \delta + X_0 m \Delta D = 0 \quad (8)$$

显然由式(8)可以看出,阻尼系数增大了。这里有两个原因,第一个是因为 PSVC 投入后具有可变的容抗  $X_b$ ,通过它可以改变系统的转移电抗。如果  $X_b$  是不变的,则式(3)将变成:

$$\Delta P_e = \frac{E U \cos D}{X_1 + X_2 + X_1 X_2 \Delta X_{b0}} \Delta D \quad (9)$$

因这时功率  $P_e$  只是功角  $D$  的函数,故将式(9)代入式(5)后阻尼系数就不再会增大;第二个原因是

$X_b = K X$  的假设。由于  $X = 2\pi f$ ,因此这一假设相当于让 PSVC 的容抗  $X_b$  的变化取决于频率的变化  $f$ 。换言之,用频率的变化量作为 PSVC 可控容抗输出的控制信号,只有这样才能增大阻尼系数,产生阻尼振荡的效果。

实际应用中,  $X$  不能用来作 PSVC 的辅助控制信号。因为通常  $X$  无法得到,为了提高系统阻尼,我们还可以采用其它辅助信号,如频率偏移,功率偏移和电流偏移等。

同样,用等面积法进行分析。在 PSVC 加入了频率辅助控制信号以后,对传输特性的影响示于图 5。

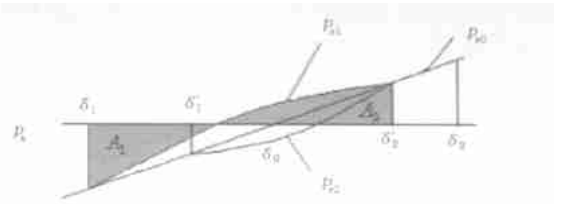


图 5 加入附加控制信号后系统的振荡

Fig 5 Oscillation after joining the signal of control to the system

$D$  时刻,  $X = 0$ , 那么  $\Delta P_D = \frac{D}{X_0} \cdot X = 0$ , 根据式(5),  $X_b = 0$ , 又  $\Delta P_e = m \Delta D + n \Delta X_b$ ,  $\Delta P_e = 0$ , 所以从  $P_{e0}$  上  $D$  出发, 当发电机转子角  $D$  增加,  $X > 0$  时, 同样根据(4)式, 输出正的  $X_b$ , 即抬高传输特性, 得传输功率  $P_{e1}$ , 此时  $\Delta P_e + \Delta P_D = m \Delta D + n \Delta X_b + \frac{D}{X_0} X$ , 如果没有辅助控制, 即只有发电机自身的

阻尼系数,  $\Delta P_e + \Delta P_D = m \Delta D + \frac{D}{X_0} X$ , 很明显, PSVC 作用时, 功角特性曲线抬高的幅度要比没 PSVC 作用时大, 这样也就减小了加速度面积, 同时又增大了减速度面积, 功角运动轨迹即为  $D > D'_0$ 。对系统增加的阻尼就取决于  $k$  的取值。当加速度面积等于减速度面积时,  $X = 0$ , 抬升的曲线  $P_{e1}$  最终又回到  $P_{e0}$ 。

$D_2$  时刻,  $X = 0$ ,  $\Delta P_D = 0$ ,  $\Delta P_e = 0$ , 从  $P_{e0}$  上出发, 当  $D$  减小,  $X < 0$  时, 输出负的  $X_b$ , 即降低传输特性, 得传输功率  $P_{e2}$ 。同理, 有 PSVC 时降低的幅度比没有 PSVC 时要大, 也就减小了减速度面积, 而增大了加速度面积, 功角轨迹为  $D'_2 > D'_0$ 。在加速度面积与减速度面积相等时,  $X = 0$ ,  $P_{e2}$  又回到  $P_{e0}$ 。可见, 通过这种传输特性的动态变化,  $X$  控制的 PSVC 能够提高系统的暂态稳定性。转子角的运动过程是  $D > D'_2 >$

$D'$ , 逐渐使振荡系统接近稳态值  $D_0$ 。

这里, 用等面积法同样也证明了 PSVC 通过频率辅助控制, 以调节其输出量  $B_{psvc}$  从而抬高或降低功角特性  $P_{e-D}$  最终实现对系统振荡的抑制作用, 使系统快速的趋于稳态值。

### 3 仿真研究

由式 (4) 可设计出 PSVC 的信号控制环节, 它的传递函数框图如图 6 所示。这个系统主要由一阶滤波, 超前滞后校正和放大等环节组成, 它可以将频率信号转换成控制电压信号  $U_{scs}$ 。

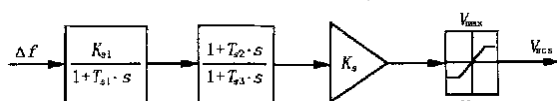


图 6 PSVC 控制信号传递函数框图

Fig 6 Block diagram of the transfer function for PSVC control signals

其中参数取值为:  $K_{s1} = 60$ ,  $K_s = 1$ ,  $V_{max} = 1.2$ ,  $V_{min} = -1.2$ ,  $T_{s2} = 0.04$  s,  $T_{s3} = 0.2$  s

根据以上分析结果, 可知在 PSVC 的闭环纯电压控制下, 引入了一个辅助控制信号  $X$ , 经过比例环节, 辅助纯电压控制, 实现对暂态过程的抑制作用。图 7 设计出了 PSVC 模型的传递函数框图。其中,  $U_t$  为测量电压,  $U_{ref}$  为参考电压,  $U_{scs}$  为控制信号电压,  $T_f$  为滤波器时间常数,  $K_{svc}$  为 PSVC 控制增益。

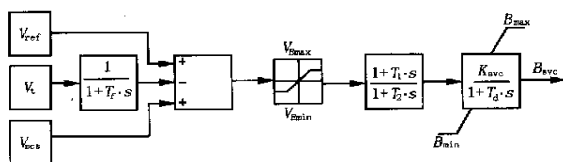


图 7 常规控制系统传递函数框图

Fig 7 Lock diagram of the transfer function for conventional control system

其中参数取值为:  $T_1 = 0.2$  s,  $T_2 = 0.06$  s,  $T_f = 0.05$  s,  $T_d = 0.003$  s,  $K_{svc} = 20$ ,  $V_{Emax} = 1.2$ ,  $V_{Emin} = -1.2$ ,  $B_{max} = 1.0$  p.u.,  $B_{min} = -1.0$  p.u.。

在图 6 和图 7 中, 我们都采用了一个非线性限幅环节。限幅运行时, 系统发电机摇摆曲线会略有变化, 但与不加时相比, 系统发电机间摇摆角明显减小。因此, 对电流或无功进行适当的限幅, 既经济, 又能满足系统稳定性要求。

这章中我们将就单机无穷大系统中接入 PSVC

的情况进行计算机仿真。所用的单机系统接线图如图 3 所示。在暂态稳定性仿真研究中, 假设故障方式为: 0 s 在发电机出口母线上发生三相短路故障, 0.1 s 切除, 0.75 s 重合闸成功。

表 1 仿真所需参数

Tab 1 Simulation parameters

|                  |                  |                      |                  |
|------------------|------------------|----------------------|------------------|
| $S_B = 100$ mVA  | $V_B = 10$ kV    | $E \angle 1.11$ p.u. | $U = 1.0$ p.u.   |
| $D = 4$          | $H = 8$ s        | $x_d = 0.2$ p.u.     | $x_1 = 0.4$ p.u. |
| $x_2 = 0.4$ p.u. | $P_0 = 0.8$ p.u. | $D_0 = 32^\circ$     |                  |

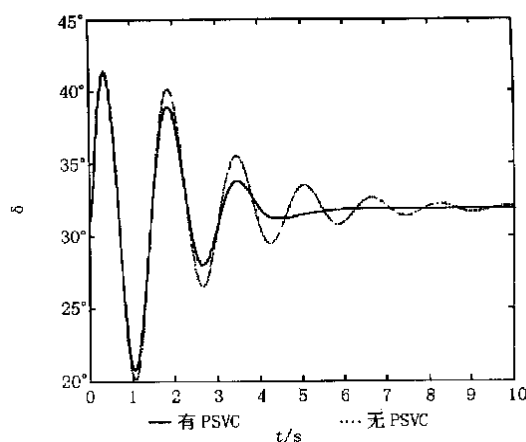


图 8 发电机转子摇摆角 D 的暂态响应曲线

Fig 8 The curve of dynamic response of angle D

如果引入母线电压频率偏差作为辅助控制信号叠加到电压反馈控制回路中, 在新的控制规律下, 静止无功补偿器将提高系统阻尼特性。由仿真验证了发电机转子摆角的迅速衰减。若系统中无 PSVC 静止无功补偿器则存在低频振荡。可见, 此控制方式引入了发电机速度偏差  $X$  这个辅助控制量, 对 PSVC 的输出  $B_{psvc}$  实行控制, 由于传输特性 ( $P-D$  曲线) 的调节作用, 使得转子摆角得以衰减, 最终趋于稳定。

### 参考文献:

- [1] Hua Jin, Geza Goos, and Luiz Lopes An Efficient Switched - Reactor - Based Static Var Compensator IEEE Trans on Industry Application, 1994, 30 (4): 998- 10041
- [2] Ji Yanchao, Hu Yongxuan, Liu Zhou A Novel Four - Bridge PWM Static Var Compensator IEE Proc - Electr Power Appl, 1997, 144(4): 249- 256
- [3] L. Angquist, J. Samuelsson Power Oscillation Damping Using Controller Reactive Power Compensation- A Comparison between Series and Shunt Approaches IEEE Trans on Power System, 1993, 8(2): 687-

695

- [4] Hammad A E. Analysis of Power Stability Enhancement By Static Var Compensators, IEEE Trans on Power System, 1986, PWR S- 1(4): 222- 227.
- [5] Zhou E Z. Application of Static Var Compensators to Increase Power System Damping IEEE Trans on Power System, 1993, 8(2): 655- 661.

收稿日期: 2003205- 01

#### 作者简介:

王 琦(1975- ), 女, 在职博士研究生, 研究方向电力电子在电力系统中应用;

李天然(1976- ), 男, 在职硕士研究生, 研究方向电力市场;

吴启涛(1974- ), 男, 博士研究生, 研究方向电力电子在电力系统中应用;

纪延超(1962- ), 男, 博士生导师, 研究方向电力电子在电力系统中应用。

### Application of PWM Static Var Compensators in Increasing Power System Damping

WANG Qi<sup>1,2</sup>, LI Tianran<sup>1</sup>, WU Qitao<sup>2</sup>, JI Yanchao<sup>2</sup>

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China

2. Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract** In the long distance and large power transmission system, the vibration of power angle hardly decays. The main reason is the shortage of system damping. This paper demonstrates that PWM static var compensator (PSVC) increases the system damping. And by the use of equal area principle, the most optimal damping is tested when PSVC adopts frequency as a control signal. And then the PSVC model is presented. Finally the simulation and calculation results certify the damping characteristics of PSVC.

**Key words** static var compensator; damping characteristics; power system transient stability

## 《机床电器》双月刊

——控制电器与应用技术杂志

- 全国优秀科技期刊二等奖
- 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊
- 《中国学术期刊》(光盘版)全文收录期刊
- 万方数据数字化期刊群全文收录期刊
- 四川省质量一级期刊



《机床电器》是由成都机床电器研究所主办, 国内外公开发行的技术刊物。邮发代号: 62-77, 每期定价: 5 元, 全年定价: 30 元。本刊主要刊登机床电器(控制电器)、低压电器、控制装置、数控数显、变频调速、PLC、工控系统及元器件、计算机应用、自动化技术及电工材料、试验与检测装置等方面的新技术、新成果和应用经验以及相关市场信息、产品介绍等。杂志始终坚持以实用性为主, 求实、求新、求精, 源于实践、服务生产的办刊原则, 以推广机床电器(控制电器)专业的先进技术和交流相关制造、应用实践经验为办刊特色。

关注业界动态 服务专业人士

汇款地址: 成都市水碾河一环路东四段 79 号《机床电器》杂志社  
邮编: 610061 Tel: (028) 84465501 Fax: (028) 84449187  
E-mail: mtea@mail.sc.cninfo.net

#### 欢迎订阅

## 电气传动自动化

ELECTRIC DRIVE AUTOMATION

(双月刊, 国际流行大 16 开版本, 国内外公开发行)

邮发代号: 54-91  
国内订价: 4.00 元  
全年定价: 24.00 元  
刊号: ISSN1005-7277  
CN62-1106/TM

- 中国电工行业技术类核心期刊
- 甘肃省优秀科技期刊
- 中国科学引文数据库来源期刊
- 中国科技论文统计源期刊

#### 重点栏目:

- 电气传动自动化技术综述
- 交直流传动技术
- 控制理论与技术
- 计算机与 PLC 技术应用
- 功率因数校正技术
- 无功补偿技术
- 实用技术经验
- 新技术、新产品信息与动态

2004 年度期刊征订及广告征订工作已经开始, 敬请新老读者尽快到当地邮局办理订阅手续, 并请新老广告客户尽快与本刊广告部联系广告发布事宜, 切勿错过订期!

本刊稿件质量、版面设置、广告设计等多年来深受国内外广大读者、作者、专家学者及广告客户的赞誉和好评。

欢迎订阅、欢迎赐稿、欢迎刊登广告!

地址: 甘肃省天水市长开路 53 号《电气传动自动化》编辑部、广告部  
邮编: 741018 电话: (0938) 8383492 转 2302  
传真: (0938) 8384023 E-mail: tsdcs@public.lz.gs.cn