

基于输出电流反馈控制策略的交流电压稳定器的研究与实验

李俊^{1,2}, 薄翠梅³, 史伟伟¹, 赵剑峰¹, 唐国庆¹

(1. 东南大学, 江苏 南京 210096; 2 南京工业大学, 江苏 南京 210009;

3 南京理工大学, 江苏 南京 210009)

摘要: 介绍了一种用于解决配电系统中电压骤升、骤降及电压谐波等电能质量问题的动态电压稳定器, 原理是通过串联逆变器注入补偿电压以消除电网电压的扰动, 实现负荷侧电压的稳定。建立了基于平均状态空间方式的数学模型, 讨论了控制策略, 为提高装置性能, 推荐了逆变器输出电流反馈的控制方法。实验结果验证了该装置的正确性和有效性。

关键词: 电能质量; 交流电压稳定器; 模型; 控制策略

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)24-0049-05

0 引言

近年来, 由于大量非线性负载的广泛使用, 使得电网中的电压受到严重影响; 而另一方面, 一些对电压敏感性的负载, 其应用也越来越多。这些设备对电压的扰动 (例如电压骤升、骤降与谐波等) 极其敏感, 电压扰动可能导致敏感性负载的应用失败、关机, 甚至损坏等。因此, 如何提高敏感性负载抗电压扰动问题, 已成为当前配电网提高电能质量的研究重点^[1]。

交流电压稳定器是一种具有消除电压跌落、骤升与电压谐波等扰动功能的用于提高配电能质量的高性能电力电子装置。本文设计的装置结构^[2,3]如图1所示。它包括一个并联在负载侧的 PWM 整流器, 一个联接于整流和逆变间的直流储能电容, 三个单相 H 桥电压源型逆变器, 三个串接在电源和负载之间的串联变压器, 以及用于消除高频开关谐波的 RC 滤波器。

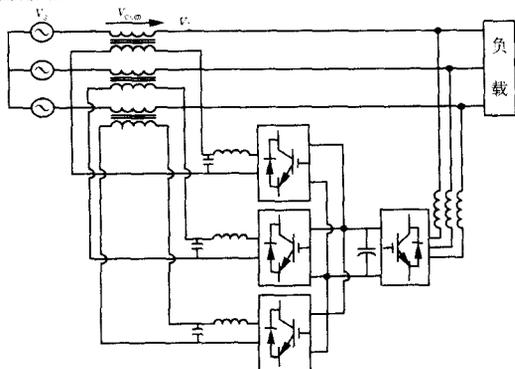


图 1 三相交流电压稳定器结构图

Fig 1 Structure of three-phase AC voltage stabilization equipment

装置消除电压扰动的原理是通过电压源型逆变器经串联变压器向电网注入适当的电压信号与电源电压相叠加, 使负载侧维持标准的正弦电压, 确保敏感性负载正常工作, 从而实现稳定交流电压的目的。由于电源电压可能存在不平衡, 因此这里采用三个电压源型逆变器作为独立补偿的能量变换器。考虑到系统实时动态及长期稳定运行的需求, 这里采用 PWM 整流的直流电容储能方法, 实现当电网电压跌落时向系统中注入能量; 当电源电压上升时吸收能量, 实现和系统之间的能量交互及缓冲功能。本文在分析装置数学模型的基础上, 运用电流反馈策略, 替代一般在动态电压恢复器中所采用的开环控制方法, 很好地实现了系统设计的性能, 达到了预定的改善负荷侧电能质量的目标。

1 交流电压稳定器的模型与分析

对一般敏感性负载, 可用线性定常阻抗来近似模拟^[5], 因此对于图 1 所示三相交流电压稳定器, 为分析方便, 下面给出其等效的单相结构图, 如图 2 所示。

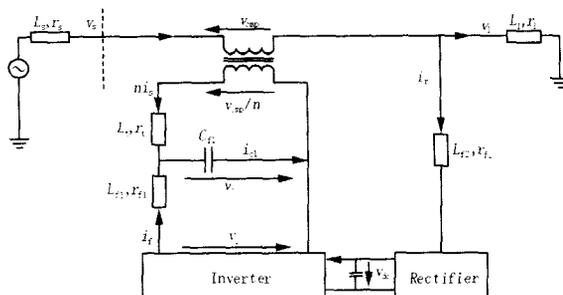


图 2 三相交流电压稳定器等效的单相结构图

Fig 2 Single-phase equivalent circuit of AC voltage stabilization equipment

在这个单相等效模型中,敏感性负载用线性定常阻抗 L_1 、 r_1 表示,图 2 中其余各参数 V_1 、 V_s 、 V_{amp} 、 V_c 、 V_i 、 V_{dc} 分别表示负载电压、电源电压、串联变压器注入电压、滤波电容电压、逆变器输出电压和直流储能电容电压, i_f 、 i_s 、 i_l 、 i_r 、 i_{c1} 、 i_{c2} 表示串联滤波电感电流、电源电流、负载电流、整流器输入电流、串联侧滤波电容电流和并联侧滤波电容电流,假定串联滤波器参数为 L_{f1} 、 r_{f1} 、 C_{f1} , 串联变压器漏感参数为 L_t 、 r_t , 变比为 $1/n$, 并联整流侧滤波参数为 L_{r2} 、 r_{r2} 、 C_{r2} , 这样可得状态方程:

$$V_1 = V_s + V_{amp} \quad (1)$$

$$V_i = L_{f1} \frac{di_f}{dt} + i_f r_{f1} + V_c \quad (2)$$

$$i_f = i_{c1} - n i_s \quad (3)$$

$$i_{c1} = C_{f1} \frac{dV_c}{dt} \quad (4)$$

$$V_{amp}/n = - (n i_s r_t + n L_t \frac{di_s}{dt} + V_c) \quad (5)$$

$$V_1 = L_1 \frac{di_l}{dt} + i_l r_1 \quad (6)$$

$$i_l = i_s - i_r \quad (7)$$

根据文献 [4], 对于 PWM 整流器, 由状态空间平均法可建立整流环节的单相动态方程:

$$\frac{di_r}{dt} = - \frac{d-d_0}{L_{r2}} v_{dc} + \frac{1}{L_{r2}} v_l \quad (8)$$

这里 $d_0 = (d_a + d_b + d_c)/3$, d_a , d_b , d_c 表示各相开关函数占空比, d_0 为零序占空比, 这里假定 v_{dc} 恒定。设单相桥式 PWM 逆变器等效比例增益为 K_i , 由于系统开关频率设计在 12.8 kHz, 因此, 动态分析时可忽略时间延迟, 根据上述方程组, 这样便可构成交流电压稳定器的开环模型, 如图 3 所示。

其中:
$$H = \frac{d-d_0}{L_{r2}} V_{dc} \quad (9)$$

实际系统中多采用这种开环控制策略, 其原理已如前所述。它通过检测电源电压 V_s 和标准参考电压 V_1^* 相减得到电源偏差, 这个电压偏差作为参考控制信号, 通过逆变器及串联变压器, 向电网注入一个极性相反的补偿电压 V_{amp} 和电源电压相叠加, 从而在负载侧得到标准的稳定电压, 实现稳压功能。

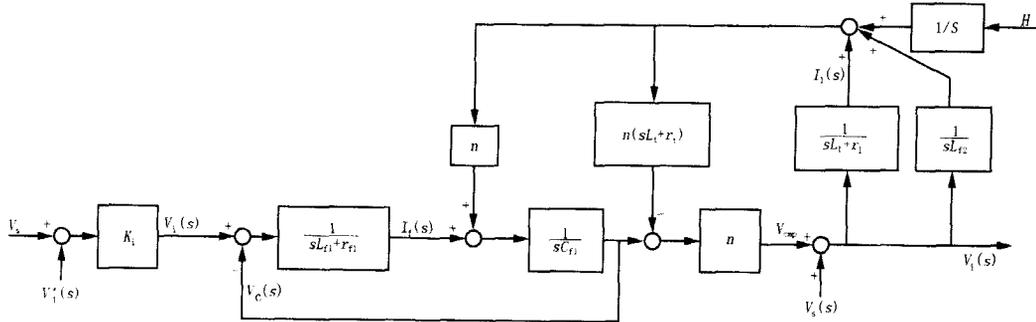


图 3 交流电压稳定器的等效开环模型

Fig 3 Equivalent open loop model of AC voltage stabilization equipment

在这个开环系统中, 如果变压器的漏感参数 L_t 、 r_t 和串联滤波器参数 L_{f1} 、 r_{f1} 足够小, 以至可以忽略, 则有 $V_i = V_c = -V_{amp}/n = K_i (V_s - V_1^*)$, 即 $V_{amp} = -K_i n (V_s - V_1^*)$, 显然只要设计的合适有 $K_i = 1/n$, 即可以 $V_s - V_1^*$ 作为参考输入消除偏差。但实际系统中, 漏感和串联滤波器参数不可能为零, 因此其开环控制必然存在误差, 这里定义偏差为 $E(s) = V_{amp} - (V_1^* - V_s)$, 根据前面建立的状态方程, 并考虑到滤波电容 C_{f1} 很小, 流经它的电流可忽略不计, 这样有 $E(s) = n^2 (r_t + L_t s + r_{f1} + L_{f1} s) I_s(s)$, 由此可见如果按反馈原理引入电流负反馈, 必将大大降低误差, 提高控制的稳态精度。为此, 这里引入电流负反馈的控制策略。

2 交流电压稳定器的控制策略 [5, 6]

为了提高交流电压稳定器的控制精度和控制性能, 必须对开环控制策略进行改进。按反馈控制原理, 抑制误差较好的方案应采取闭环反馈策略。根据前文分析, 由于误差是因为漏感和串联滤波器参数不为零而产生的, 因此这里引入电源电流负反馈, 包围这些参数所在的回路, 以达到抑制误差的目的。设电源电流反馈系数为 K_{fi} , 并采用基于 dq0 的坐标变换实现交流电压稳定器的反馈控制, 如图 4 所示。其中 P 为相应的变换矩阵, 它将检测到的 abc 坐标下的电网电压变换到 dq0 坐标下的电网电压。P 变换阵见公式 (10)。

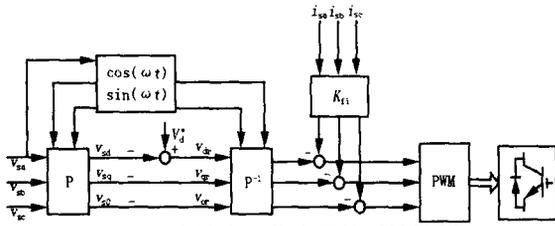


图 4 交流电压稳定器的反馈控制

Fig 4 Feedback control of AC voltage stabilization equipment

$$P = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

dq0坐标下的标准给定电压通过下面的坐标变换,可得到

$$\begin{bmatrix} v_d^* \\ v_q^* \\ v_0^* \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (11)$$

对于测量到的电源电压,通过 P 变换,有:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_{s0} \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (12)$$

对于标准参考电压,在实际中采用预建立、存储三相电压数字表供调用的方法来获得,参考电压的相位由电源电压 v_{sa} 锁相确定。考虑到 v_{sa} 可能在过零点畸变、抖动、直流漂移等因素,在锁相前增设了交流放大及带通滤波器等措施。由于标准给定电压对称,在 P 阵变换下,有 $v_q^* = 0, v_0^* = 0$ 。

将 dq0 坐标下的负载侧标准电压与 dq0 坐标下的电网电压相比较,有:

$$\begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{q1} \\ v_{01} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d^* \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_{s0} \end{bmatrix} \quad (13)$$

然后将结果从 dq0 坐标下反变换到 abc 坐标下,并和电流反馈信号进行比较,得到控制参考信号:

$$\begin{bmatrix} v_{aref} \\ v_{bref} \\ v_{cref} \end{bmatrix} = P^{-1} \begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{q1} \\ v_{01} \end{bmatrix} - K_{fi} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (14)$$

控制参考信号产生的 PWM 控制信号,通过门极驱动电路控制逆变器注入补偿电压,从而保持负载侧交流电压的稳定。

3 直流储能电压的稳定控制

由图 1 可见,为了实现三相交流电压的长期稳定调节,必须有一个直流储能设备,以吸收或提供电网和逆变器之间通过串联变压器进行的能量交互。这里采用直流电容作为储能设备,显然为了实现可靠而稳定的交流电压调节,必须保证直流电容上的电压稳定,同时还应尽可能保证给电容供电的装置不会引入新的干扰。因此,这里采用并联 PWM 整流器实现对电容电压的控制,它不仅能保持高功率因数,同时电容有功能量又可以通过并联 PWM 整流桥和电网进行交互。

为了保持电容电压的稳定,既实现无差控制,根据控制原理的分析,显然在这里电容电压可采用比例积分控制策略(P 控制),实现电容电压稳态无静差。PI 调节器的输出作为在 dq0 坐标下期望电流的 d 轴参考输入信号,并采用电流滞环控制策略,如图 5 所示。

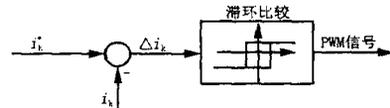


图 5 电流滞环控制策略

Fig 5 Control strategy of current hysteresis

在该方式中,把电流的参考信号 i_k^* (k 为 a, b, c) 与实际的电流信号 i_k 进行比较,两者的偏差 Δi_k 作为滞环比较器的输入,通过滞环比较器产生控制主电路中开关通断的 PWM 信号,该 PWM 信号经驱动电路来控制开关器件的通断,从而控制电流 i_k 的变化。因此,综合控制的需求,有如图 6 所示的并联侧直流电容电压的控制策略。

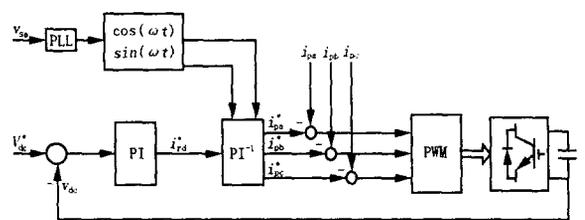


图 6 直流电容电压的控制策略

Fig 6 Control strategy of DC capacitance voltage

在并联侧的控制采用基于 dq0 坐标的电流滞环控制下,直流储能电容的电压偏差通过 PI 控制得到期望的 d 轴输入电流 i_{d1}^* ,将期望的 dq0 坐标下输入电流 i_{d1}^* 变换至 abc 坐标下,得到期望的输入电流:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{pa}^* \\ \dot{i}_{pb}^* \\ \dot{i}_{pc}^* \end{bmatrix} = P^{-1} \begin{bmatrix} \dot{i}_{td}^* \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

用期望的输入电流和实际的输入电流先后比较,得到各相电流的偏差:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{aif}^* \\ \dot{i}_{bif}^* \\ \dot{i}_{cif}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{i}_{pa}^* \\ \dot{i}_{pb}^* \\ \dot{i}_{pc}^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{i}_{pa} \\ \dot{i}_{pb} \\ \dot{i}_{pc} \end{bmatrix}$$

然后将偏差作为控制参考信号,通过滞环比较器,产生 PWM 控制信号,实现并联侧 PWM 整流器的控制。

4 实验设计与测试

为了满足一些挂接在配电网敏感负载对高质量电压的需求,设计了如图 1 所示的三相交流电压稳定器实验装置^[7],作为负载端电压质量补偿装置,以验证交流电压稳定器在改善电网电压的功能及作用。一些设计参数如下:装置容量 15 kVA,直流电容 3 300 μ F/600 V,变压器变比 1:7,逆变与整流侧滤波电感为 7 mH,滤波电容为 1 μ F,标准负载电压为 220 V/50 Hz,IGBT 的开关频率为 16 kHz。为了实现系统的实时快速控制,硬件设计采用了 TMS320F240 DSP 作为控制器,由于 DSP 的运行快速性,它不仅能够执行前文所提到的控制策略,实现快速数据分析与控制任务,同时又能够完成数据采集、DSP 和 PC 的通讯功能,因此硬件设计简化了。

装置的控制策略采用了前文所提到的控制方案,即对交流电压稳定器和直流电容电压分别进行控制,以获取配电网稳定的高质量电压。对所设计的装置进行实验测试,其直流储能电容电压控制的测试曲线如图 7 所示。

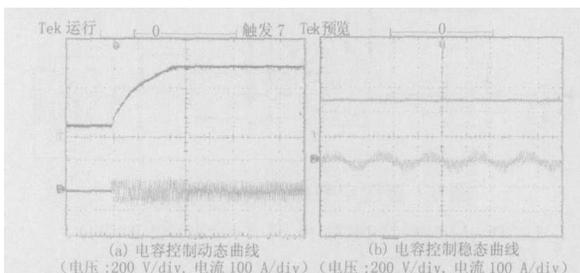


图 7 电容电压控制的测试曲线

Fig 7 Test curves for capacitance voltage control

图 7(a)所示曲线为并联侧直流储能电容起始充电过程中,直流电容端电压及 A 相充电电流动态波形。直流电容设定值为 300V,调试中所选的参数

为过阻尼状态,所以上升时间较长。从动态过程中可以看出,系统具有良好的运行性能,进入稳态时达到了预定的期望值。

图 7(b)所示曲线为稳态时直流电容端电压及 A 相输入电流曲线。

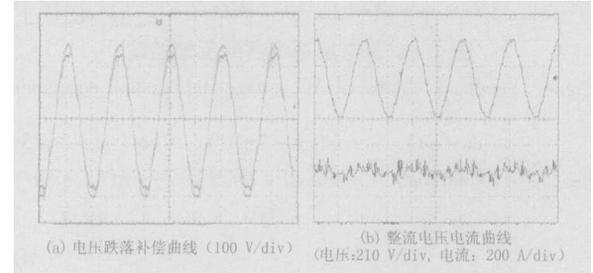


图 8 电压跌落时曲线

Fig 8 Curves of voltage sag

图 8(a)所示曲线为系统发生 10% 电压跌落时,所测试的交流电压稳定器输入和调节后输出的 A 相电压输入、输出曲线。

图 8(b)所示曲线,是在系统发生 10% 电压跌落时,交流电压稳定器和并联整流同时协调工作的运行状态进行测试的 A 相整流输入电压、电流曲线。其中通道 1 为补偿后 A 相电压波形,通道 2 为 A 相电流波形。由图 8(a)所示, A 相补偿前后的波形可以看出,对畸变的 A 相电压,通过补偿能大大地改善其性能。同时由图 8(b)所示, A 相电压波形和电流波形可以看出,并联 PWM 整流输出电压、电流保持了较好的相位同步关系,但电流波形不够平滑,这说明本文所设计的并联 PWM 整流器输出滤波器有待改善与修正。

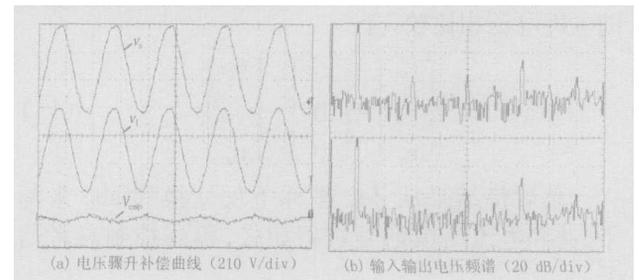


图 9 电压骤升时曲线

Fig 9 Curves of voltage sudden increase

图 9(a)所示波形为骤升的电源电压、补偿输出负载端电压和逆变器补偿注入电压曲线;图 9(b)则为交流电压稳定器的调节前后的输入输出电压频谱曲线。

图 10 所示曲线为交流电压稳定器在改善电压

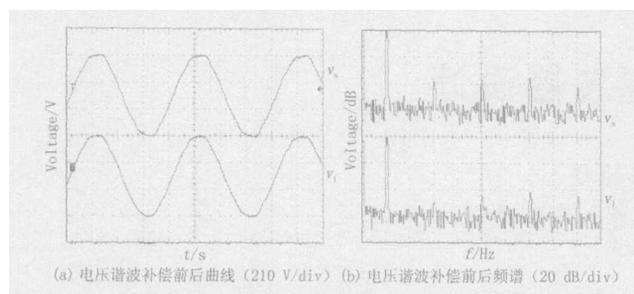


图 10 电压谐波补偿前后曲线与频谱

Fig 10 Curves and spectrum pre/post voltage harmonics

谐波方面所起滤波功能测试结果。图 10(a)为交流电压稳定器在滤波前后的输入输出电压曲线, (b)图则为交流电压稳定器在滤波前后的电压频谱图。

实验结果表明,所设计的交流电压稳定器能较好地改善电网电压跌落、骤升和电压谐波等引起的电能质量问题。对需求较高电压质量的敏感性负载而言,交流电压稳定器是一种较好的能提高配电质量的高性能电力电子装置,它对稳定电压及谐波滤除具有重要的作用。

参考文献:

- [1] Middlekauff SW, Collins E R. System and Customer Impact Considerations for Series Custom Power Devices [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 12 (1): 278-282
- [2] Fujita H, Akagi H. The Unified Power Quality Conditioner: the Integration of Series and Shunt Active Filters [J]. IEEE Trans on Power Electro, 1998, 13 (2).

- [3] Moran L, Pastorini I, Dixon J, et al Series Active Power Filter Compensating Current Harmonics and Voltage Unbalance Simultaneously [J]. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib, 2000, 147 (3): 31-36
- [4] MAO Heng-chun, Boroyevich Du-shan, Lee F C Y. Novel Reduced-order Small-signal Model of a Three-phase PWM Rectifier and Its Application in Control Design and System Analysis [J]. IEEE Trans on Power Electro, 1998, 13 (3).
- [5] Vilathgamuwa M, Ranjith Perera A A D, Choi S S. Performance Improvement of the Dynamic Voltage Restorer with Closed-loop Load Voltage and Current-mode Control [J]. IEEE Trans on Power Electro, 2002, 17 (5): 824-824
- [6] WANG Zhao-an, WANG Qun, YAO Wei-zheng, et al A Series Active Power Filter Adopting Hybrid Control Approach [J]. IEEE Trans on Power Electro, 2001, 16 (3): 301-310
- [7] CAO Ran, ZHAO Jian-feng, SHI Wei-wei, et al Series Power Quality Compensator for Voltage Sags, Swells, Harmonics and Unbalance [A]. Transmission and Distribution Conference and Exposition 2001. 543-547.

收稿日期: 2005-05-08; 修回日期: 2005-08-14

作者简介:

李俊(1972-),男,博士生,讲师,主要从事电力电子及应用方面的相关研究。E-mail: j262402@163.com

Study and test of AC voltage stabilizer based on current feedback control

LI Jun^{1,2}, BO Cuimei³, SHI Weiwei¹, ZHAO Jian-feng¹, TANG Guo-qing¹

(1. Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 3. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The paper introduces a dynamic AC voltage stabilizer that is used to solve the problem of power quality about voltage sags, voltage swells and harmonics in power system. The theory is to inject series voltage to eliminate the voltage disturbances by series inverters for realizing voltage stability on load. Using the state-space averaging method, this paper sets up the mathematic model of the voltage stabilizer and discusses its control strategies. In order to improve the equipment performance, a current feedback control strategy for the dynamic AC voltage stabilizer is proposed. Experimental results verify the validity and effectiveness of the equipment.

Key words: power quality; AC voltage stabilizer; model; control strategy

祝广大读者节日快乐!