

DOI: 10.7667/PSPC150539

# 一种火电机组用电力电子式电压扰动发生器研究

殷骏<sup>1</sup>, 李刚<sup>1</sup>, 汤伟<sup>2</sup>, 刘路登<sup>2</sup>

(1. 安徽立卓智能电网科技有限公司, 安徽 合肥 230601; 2. 国网安徽省电力公司调度控制中心, 安徽 合肥 230022)

**摘要:** 为了准确分析火电机组变频调速系统的高低电压穿越能力, 针对市场对电压穿越能力试验设备的需求, 提出一种新型电力电子式的电压扰动发生器的设计。采用不可控整流和 BOOST 升压电路, 将不可控整流电路输出的直流电升压到预定电压后输出, 再经过逆变器控制输出任意模拟电压故障波形。所提设计可模拟单相、两相及三相电压的暂升和暂降, 其持续时间、深度、起止相位和类型均可做到持续调节。实验结果证明: 这种新型电压扰动发生器设计安全可靠, 能够准确反应电网故障电压类型, 可广泛用于火电机组变频调速系统高低电压穿越能力试验研究。

**关键词:** 低电压穿越; 电压暂升; 电压暂降; BOOST 升压电路; 电压扰动发生器

## A kind of power electronic voltage disturbance generator used in thermal power units

YIN Jun<sup>1</sup>, LI Gang<sup>1</sup>, TANG Wei<sup>2</sup>, LIU Ludeng<sup>2</sup>

(1. Anhui Lizhuo Smart Grid Technology Company Limited, Hefei 230601, China;

2. Dispatching and Control Center of State Grid Anhui Electric Power Corporation, Hefei 230022, China)

**Abstract:** In order to accurately analyze the high- and low-voltage ride through capacity of variable frequency speed regulation system in thermal power unit, this paper proposes a new design of power electronic voltage disturbance generator, according to the market demand on the voltage ride through capacity testing equipment. It adopts uncontrollable rectifier and booster circuit, which boosts the direct current voltage generated by uncontrollable rectifier circuit to the scheduled voltage, and then controls output analog voltage fault waveform through the inverter. It can simulate single-, bi-, and tri-phase voltage swell and sag, and its duration, depth, start-stop phase and type can all be adjusted smoothly. The experimental results prove that the new designed voltage disturbance generator is safe and reliable, which can correctly reflect the grid fault voltage type, and can be widely used in studying the high- and low-voltage ride through ability of frequency speed regulation system in thermal power unit.

**Key words:** low voltage ride through; voltage swell; voltage sag; BOOST circuit; voltage disturbance generator

## 0 引言

低电压穿越最早在风力发电中提出, 在火力发电领域国家电网给出的释义是: 火电机组辅机变频器及供电对象设备外部故障或扰动引起的暂态、动态或长时间电源进线电压降低到规定的低电压穿越区内时, 能够可靠供电, 保障供电对象的安全运行<sup>[1]</sup>。但是变频器受限于本身的硬件条件, 对于电压的瞬时波动比较敏感。变频器在低电压穿越区内, 电压瞬时变化量超过了变频器的允许值时, 如不采取措施, 变频器将会立即报警停机, 并同时触发 MFT(锅炉主燃料断)保护功能动作, 导致锅炉发生熄火停炉事故<sup>[2]</sup>, 严重影响发电机组的安全运行。

研究表明, 电压暂降是电力系统不可避免的电能质量问题, 也是导致电能质量事故的主要因素。在电力系统发生三相短路故障、两相短路故障和单相接地短路故障时, 短时的电压扰动(暂升或暂降)严重影响计算机、交流接触器、可编程逻辑控制器(PLC)、变频调速装置等典型敏感设备的安全运行, 这些敏感负荷的故障给工厂带来的直接经济损失巨大<sup>[3-4]</sup>。鉴于电网故障的不可控性, 在研究电力系统各类负载在电压发生扰动时的工作状态时, 就必须要有专门的装置用来模拟故障电源, 这种设备称为电压扰动发生器(VDG)。

目前国内研究发电厂辅机变频调速系统的低电压穿越能力的测试设备, 多为采用变压器多抽头方

式实现某一电压暂降深度，用接触器和单片机控制暂降时间，其输出电压只能是输入电压值的几档固定变比，切换时间一般有近 20 ms 的延时，对于电网故障模拟研究只能起到一定辅助作用，无法做到控制输出某一精确故障电压值和持续时间<sup>[5]</sup>。火电机组试验环境相对恶劣，空间狭小，且设备搬运不便。这就需要试验用电压扰动发生器具有控制简单、精度高、灵活性高、体积小、成本低等特点，便于现场试验场合使用。

### 1 电力电子式电压扰动发生器的设计

本文研究的一种电力电子式电压扰动发生器，通过在不可控整流电路和逆变电路之间设置升压电路，可模拟电压中断、暂升、暂降等组合故障情况。同时，相对于利用变压器来进行升压的方式，本设计在直流侧设置升压电路，在同样输出容量情况下占用体积小，电压在量程范围内可实现无级高精度变化，电压由稳态至暂态切换时间可达到微秒级，相对于采用可控整流电路和逆变电路组成的发生器来说，本设计中整流电路采用不可控整流和 BOOST 升压电路，控制算法简单，发热量低，且不可控整流电路的硬件成本低。

#### 1.1 电压扰动发生器的拓扑

本文采用的三相电压扰动发生器主要是由不可控整流、BOOST 升压电路、电压型 PWM 变流器组成，拓扑电路实现原理图如图 1 所示。

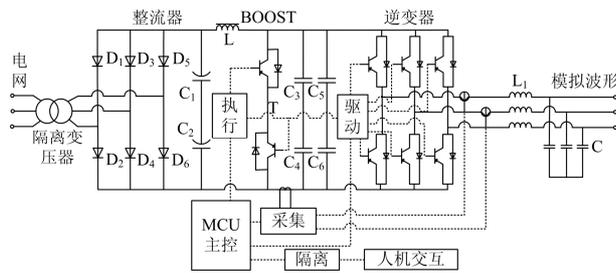


图 1 三相电压扰动发生器拓扑电路

Fig. 1 Topology circuit of three-phase voltage disturbance generator

电网电压经过 AC/DC 整流器，BOOST 升压和 DC/AC 逆变器的变换后为负载提供故障模拟电源。其中，整流器采用三相不可控全桥整流，然后经过 BOOST 升压电路，始终保持直流侧电压的稳定。对逆变器的精确控制，可以模拟电网电压的各类短路故障，生成所需要的任意电压波形，包括电压的扰动和闪变、三相不平衡度、电网谐波等故障<sup>[5]</sup>。其中针对电压扰动，还可以方便地控制电压扰动的幅度、持续时间、相位角和扰动类型<sup>[6]</sup>。

### 1.2 电压扰动发生器的数学模型

#### (1) 电压扰动类型

电压扰动中，电压暂升是指在电力系统某点工频电压均方根值暂时升高至 1.1~1.8 p.u.，并在短暂持续 10 ms~1 min 后恢复正常的现象。电压暂升又分为工频过电压和谐振过电压。一般是由于线路空载，接地故障、甩负荷和因操作或故障引起的系统元件出现的不利组合造成的。

电压暂降是指在电力系统某点工频电压均方根值暂时降低至 0.01~0.9 p.u.，并在短暂持续 10 ms~1 min 后恢复正常的现象。电压暂降最常见的原因是短路故障，大功率感应电机的启动和雷击事故。占主要事故原因的短路故障分为单相，两相，三相接地短路和相间短路<sup>[6]</sup>。其暂降类型大体有 A、B、C、D、E、F、G 七种，向量图如表 1 所示，其中  $\dot{V}_a$ 、 $\dot{V}_b$ 、 $\dot{V}_c$  为电压暂降后的三相电压向量。

表 1 故障电压暂降的典型类型

Table 1 Typical types of fault voltage sag

类型	向量图	类型	向量图
A		E	
B		F	
C		G	
D			

市场上使用的大部分电压扰动发生器均不能完全模拟出这七种暂降类型。利用中心抽头在变压器副边相互切换实现电压暂降的发生器在电压暂降和恢复瞬间可能由于开关过程存在电压中断，且暂降深度不能连续无极调节；阻抗形式的电压扰动发生器除了以上问题外，暂降深度也难以有效控制。

#### (2) dq0-abc 坐标系变换

三相电压扰动发生器系统的设计基础是扰动电压的快速检测技术，常见的电压快速检测方法有很

多种。其中有效值计算法需要至少半个基波周期的时间(10 ms)才能实现对电压扰动的准确判断,且无法区分电压中的正序,负序和零序分量;基波分量法,对采样电压的对称性要求很高,延时较长,实时性较差;基于瞬时电压的  $d-q$  变换方法,可以快速的检测出电压变换值<sup>[7-10]</sup>。首先,我们根据电压扰动发生器的拓扑结构,利用电路理论基本的定律,在三相静止坐标系中建立三相电压扰动发生器的一般数学模型。 $dq0$  坐标系是一种与转子一起旋转的两相坐标系和零序系统的组合。若转子为凸极,则  $d$  轴通常与凸极的中心轴线重合,  $q$  轴则超前于  $d$  轴  $90^\circ$ ,如图 2 所示。

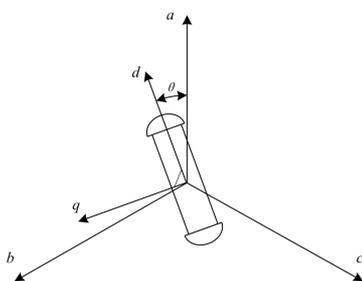


图 2 dq0 坐标变换

Fig. 2 Transformation of dq0 coordinates

目标扰动电压在  $dq$  同步旋转坐标系上投影,经  $dq0$  分解得到相应的  $d$  轴,  $q$  轴和 0 轴电压分量。完成复合运算后再经  $dq0-abc$  逆变换得到三相故障电压调制信号,而对于不含零序分量的电压扰动故障,  $dq0-abc$  变换时采用传统变换模式,如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t & 1 \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  为电压幅值;  $\omega$  为角频率; 为  $u_d$ 、 $u_q$ 、 $u_0$  为三相电压在  $d$ 、 $q$  和 0 轴电压分量;  $t$  为时间变量。

而对于含有零序分量的电压扰动故障,  $dq0-abc$  变换矩阵式修正为式(2)。

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t & \cos \omega t \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos \omega t \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

本方法在三相电压扰动产生方案中的  $dq0-abc$

环节采用变换矩阵式,从而生成对称、不对称含零序以及不对称不含零序三种情形下的所有故障电压波形<sup>[5]</sup>。

### (3) 电压扰动发生器的控制原理

根据电压扰动的数学模型,使用 DSP2812 作为核心处理器,快速进行电压扰动波形的调制输出,其原理框图如图 3 所示。

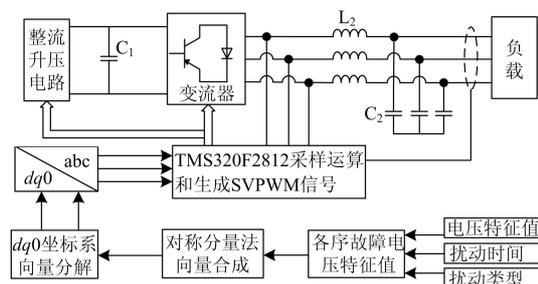


图 3 空间矢量控制原理框图

Fig. 3 Principle diagram of space vector control

各相序故障电压特征值经过  $abc$  三相静止坐标系到  $dq0$  同步旋转坐标系进行坐标投影变换,在  $dq0$  坐标系下完成复合运算,再经  $(dq0-abc)$  逆变换生成空间矢量脉宽调制信号(SVPWM),控制逆变器工作,在功率放大以后驱动逆变器输出侧产生需要的目标故障电压,并且可以做到自动满足故障期间三相电压之间复杂的相位和幅值关系。

## 2 电压扰动发生器实现的主要保护电路

### 2.1 过流保护电路

如图 4 所示,电流实际值经过霍尔传感器及采样电阻,滤波后经过运算放大器的电压并联负反馈将电流信号转换成  $-3.3 \sim +3.3$  V 的弱电压信号,此电压信号经过信号处理得到  $0 \sim 3.3$  V 的单极性电压信号并输入到电压跟随器,最后经过限幅,确保输入进 MCU 的信号为  $0 \sim 3.3$  V。

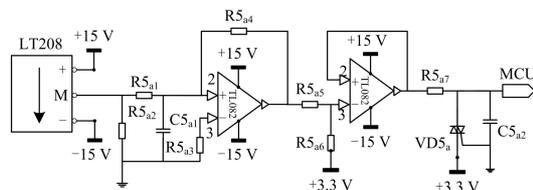


图 4 过流保护电路

Fig. 4 Over-current protection circuit

若交流测电流大于设定阈值,过流保护电路启动,DSP 接收到过流信号,则封锁 IGBT 脉冲输出。

### 2.2 过压保护电路

如图 5 所示,小电流信号经过  $R1_{a1}$  和  $C1_{a1}$  抑制干扰后,进入 TL082 的运放构成的射极跟随器,然

后经过两个电阻和一个电压源组成的电压偏移电路，再经过射极跟随器和箝位限幅电路，保证采样信号的幅值在 0~3.3 V 之间，满足 MCU 的输入信号要求。

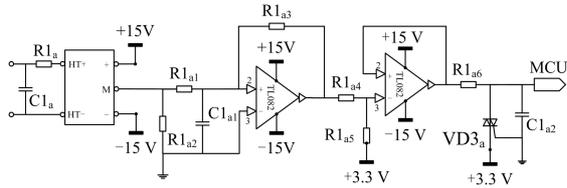


图 5 过压保护电路

Fig. 5 Over-voltage protection circuit

若交流侧电压大于设定阈值  $V_1$  (过压值) 或者小于设定阈值  $V_2$  (欠压值)，MCU 会启动保护电路，DSP 发送过压或者欠压信号，并同时封锁 PWM 脉冲。

### 2.3 IGBT 驱动电路

如图 6 所示，IGBT 驱动电路采用 TLP-4504 光耦隔离，将 DSP 发出的 SVPWM 波控制信号转变为各个桥臂的 IGBT 驱动信号，保证 IGBT 模块能正常工作。IGBT 模块的过压、过流、过热、欠压等各种保护功能故障，通过 PC817 光耦隔离，发送给控制电路。

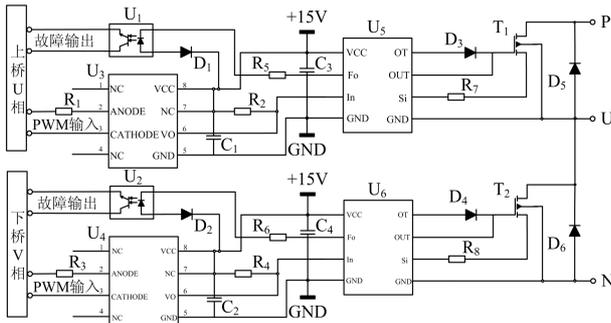


图 6 IGBT 驱动电路

Fig. 6 IGBT driving circuit

## 3 试验波形

由上述设计方案制作的电压扰动发生器，其输出三相电压可自动满足故障时各相之间的幅值和相角关系，可真实地反映出电力系统中电压扰动的各类电压故障特征。

通过使用 IGBT 和相关器件制作的电压扰动发生设备，完成后任意预设电压扰动类型、故障相电压值以及故障持续时间，对由 A、B、C、D、E、F、G 七类电压暂降类型和暂升类型进行试验模拟，结果符合设计要求，部分实测波形如图 7~图 12 所示。故障持续时间  $t=0.5\sim 60$  s，扰动深度选择  $130\%U_e$ 、 $90\%U_e$ 、 $75\%U_e$ 、 $60\%U_e$  和  $20\%U_e$ ， $U_e$  为额定电压。

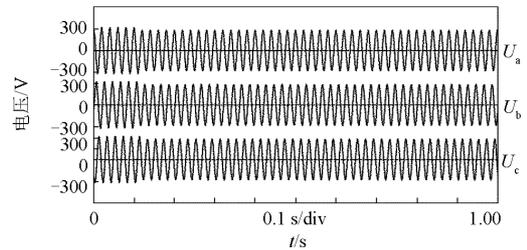


图 7 三相对称电压扰动暂降为  $90\%U_e$  的波形

Fig. 7 Waveform figure of three-phase voltage sag to  $90\%U_e$

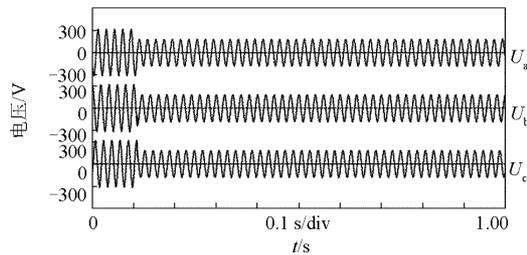


图 8 三相对称电压扰动暂降为  $60\%U_e$  的波形

Fig. 8 Waveform figure of three-phase voltage sag to  $60\%U_e$

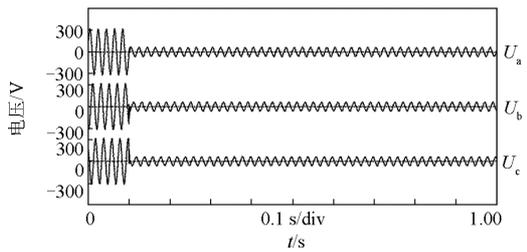


图 9 三相对称电压扰动暂降为  $20\%U_e$  的波形

Fig. 9 Waveform figure of three-phase voltage sag to  $20\%U_e$

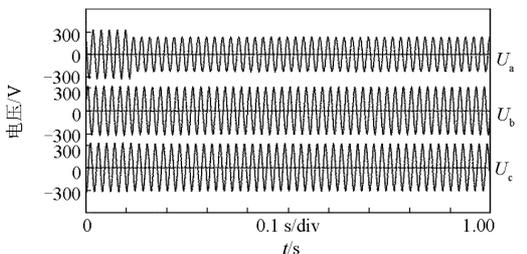


图 10 仅 A 相电压扰动暂降为  $75\%U_e$  的波形

Fig. 10 Waveform figure of A phase voltage sag to  $75\%U_e$

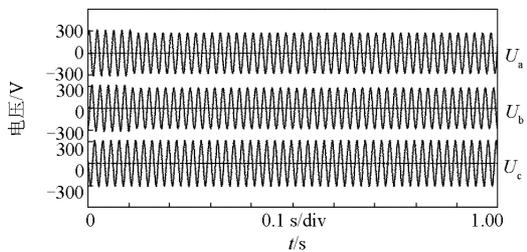


图 11 A、B 相电压扰动暂降为  $90\%U_e$  的波形

Fig. 11 Waveform figure of A&B phase voltage sag to  $90\%U_e$

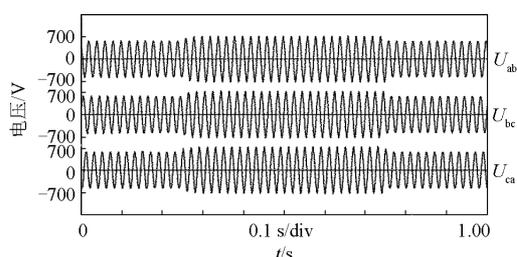
图 12 三相电压扰动暂升为  $130\%U_e$  的波形

Fig. 12 Waveform figure of three-phase voltage swell to  $130\%U_e$

#### 4 结语

本文对一种新型电力电子式电压扰动发生器的设计与实现理论进行了研究,提出了一种直流侧采用 BOOST 升压技术的三相电压扰动发生器的设计方法,以精确产生所需要的各类不对称电压扰动,实验结果表明,基于此控制策略的电压扰动发生器具有较好的动态和静态性能,能够满足火电机组辅机变频调速系统的低电压穿越能力测试和穿越能力改造后的验收测试<sup>[1]</sup>,也可以推广应用于其他需要使用电压扰动源的试验环境。

#### 参考文献

- [1] 袁小平, 李承宪, 谢明, 等. 火电厂变频设备的低电压穿越能力[J]. 能源研究与管理, 2014(4): 99-100.  
YUAN Xiaoping, LI Chengxian, XIE Ming, et al. Low voltage ride through capability of frequency conversion equipment in thermal power plant[J]. Energy Research and Management, 2014(4): 99-100.
- [2] 赵建中. 350 MW 机组给煤机变频器电源瞬停时维持连续运行的方法[J]. 中国电力, 2010, 43(3): 51-54.  
ZHAO Jianzhong. The method for maintaining continuous operation of 350 MW unit coal feeder inverter power supply transient stop[J]. Electric Power, 2010, 43(3): 51-54.
- [3] 甄晓晨, 陶顺, 肖湘宁, 等. 电压暂降的工厂级经济损失评估模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 104-111.  
ZHEN Xiaochen, TAO Shun, XIAO Xiangning, et al. An evaluation model of plant-level economic loss due to voltage dips[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 104-111.
- [4] 孔祥雨, 徐永海, 陶顺. 基于一种电压暂降新型描述的敏感设备免疫能力评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 165-171.  
KONG Xiangyu, XU Yonghai, TAO Shun. Sensitive equipment immunity assessment based on a new voltage sag description[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 165-171.
- [5] 李军军, 易吉良, 张松科, 等. 风电用变压器型电压跌

落器及保护系统的研究与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 96-102.

- LI Junjun, YI Jiliang, ZHANG Songke, et al. Research and design of transformer typed voltage sag generator and protection system for wind power generation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 96-102.
- [6] 陈丽, 王硕, 孔维功. 基于改进 S 变换的复合电压暂降源识别特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 27-33.  
CHEN Li, WANG Shuo, KONG Weigong. Method to identify composite voltage sag disturbance sources based on generalized S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 27-33.
- [7] 张波, 颜湘武, 王树岐. 基于 dq 变换的三相电压暂降生成方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 55-61.  
ZHANG Bo, YAN Xiangwu, WANG Shuqi. Method of three-phase voltage sag forming based on dq transformation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 55-61.
- [8] 肖助力, 龚仁喜, 陈双. 一种改进不完全 S 变换的电压暂降检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 62-68.  
XIAO Zhuli, GONG Renxi, CHEN Shuang. Detection of voltage sag by a modified incomplete S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 62-68.
- [9] 苏刘军, 鲁宝春, 李昌超, 等. 一种改进的无锁相环三相电压波动检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 121-126.  
SU Liujun, LU Baochun, LI Changchao, et al. An improved detection method without phase-locked loop for three-phase voltage fluctuation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 121-126.
- [10] 卢远宏, 郑琼林, 马亮. 基于三维空间法向量的三相电压幅值检测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 155-164.  
LU Yuanhong, ZHENG Qionglin, MA Liang. Three-phase voltage amplitude detection based on 3D space normal vector[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 155-164.

收稿日期: 2015-03-11; 修回日期: 2015-08-30

#### 作者简介:

殷 骏 (1968-), 男, 本科, 高级工程师, 从事电力系统自动化控制研究工作; E-mail: ah\_landream@126.com

李 刚 (1978-), 男, 本科, 工程师, 从事电力系统自动化控制、电力电子产品的研究工作;

汤 伟 (1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电网分析与控制策略研究方面工作。

(编辑 张爱琴)