

# 基于逆系统模型的配电网静止同步补偿器 双变量非线性控制策略

肖华根, 刘桂英, 粟时平, 蒋陆萍, 张伊洁

(长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410114)

## A Nonlinear Double Variable Control Strategy Based on Inverse System Model of Static Synchronous Compensator for Distribution Network

XIAO Huagen, LIU Guiying, SU Shiping, JIANG Luping, ZHANG Yijie

(College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology,  
Changsha 410114, Hunan Province, China)

**ABSTRACT:** Based on the analysis on the relation between the phase angle difference of output voltage of distribution static synchronous compensator (STATCOM) for distribution network and network voltage and that between the active and reactive power absorbed by the Statcom, a steady state inverse system model of Statcom for distribution network is built. Taking the phase angle difference and the modulation ratio as the variables, a double variable current control strategy, in which the steady state inverse system model is taken as main controller and the closed-loop current feedback control as auxiliary controller, is proposed, and the capacitor voltage at DC side is controlled by adjusting the phase angle difference. Besides, nonlinear PID control is led into compensation current control and capacitor voltage control to make the Statcom possessing good adaptive ability. The feasibility and effectiveness of the proposed control strategy are verified by simulated experiment of the Statcom for distribution network.

**KEY WORDS:** STATCOM for distribution network; inverse system model; double variable; nonlinear PID control

**摘要:** 通过分析配电网静止同步补偿器(distribution static synchronous compensator, DSTATCOM)的输出电压与电网电压的相角差 $\delta$ 与装置吸收的无功功率和有功功率的关系,建立了DSTATCOM稳态逆系统数学模型。提出以稳态逆系统数学模型为主控制器、电流反馈闭环控制为辅助控制器的双变量( $\delta$ 和 $M$ )电流控制策略,并通过调节 $\delta$ 角控制直流侧电容电压。同时在补偿电流与直流侧电容电压控制中引入非线性PID控制技术,使得装置具有很好的自适应能力。最后经DSTATCOM模拟装置证明了所提控制方法的可行性和有效性。

**关键词:** 配电网静止同步补偿器; 逆系统模型; 双变量; 非线性PID控制

## 0 引言

随着非线性用电设备的增加和电力电子技术的发展,用于输电网无功补偿的静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)的研究越来越受重视<sup>[1-9]</sup>。而使用IGBT等高频开关器件的配电网静止同步补偿器(distribution STATCOM, DSTATCOM)同样受到越来越多的关注<sup>[10-13]</sup>。

目前,对于DSTATCOM的研究主要集中在装置级数学模型的建立和控制策略的研究方面。模型的精确性和控制策略的优化对保证DSTATCOM的响应速度和补偿效果起着关键作用<sup>[14]</sup>。由于基于IGBT逆变桥的DSTATCOM中可关断器件的开关频率高,开关损耗占装置损耗的比例较大,而且其开关损耗是随输出电流变化而变化的,用固定电阻来模拟该损耗不够准确<sup>[15]</sup>。因此对于DSTATCOM控制器的设计,不能完全依赖数学模型。

目前,国内外对DSTATCOM控制方法的研究几乎集中在非线性控制领域,主要有模糊控制、神经网络、变结构控制及其与常规PID控制器的结合等控制方法<sup>[16-18]</sup>。上述控制方法共同的优点是不需要知道被控对象的精确数学模型,但由于目前已投产的DSTATCOM装置不多,经验数据缺乏成为制约其实际工程应用的主要问题,而且神经网络的在线训练一直是个难题<sup>[19]</sup>,而变结构控制系统由于切换开关非理想等因素,易使滑动模态产生高频抖

振, 其中常规 PID 控制是设计简单、实用的方法, 但是它存在自适应能力差的缺陷。

为此, 本文提出基于逆系统模型的 DSTATCOM 的双变量非线性控制方法。该方法既利用了逆系统方法的直观、简单, 又克服了要求被控对象的数学模型精确已知的难题, 同时还具有较强的自适应能力。由于该控制策略的输出为相角差  $\delta$  与调制比  $M$ , 因此其可应用于采用脉宽调制技术 (pulse width modulation, PWM) 的以电压源型逆变器 (voltage source inverter, VSI) 为拓扑结构的配电网静止同步补偿器。

### 1 DSTATCOM 的工作原理与数学模型

#### 1.1 工作原理

本文研究的 DSTATCOM 主回路是将基于 IGBT 的三相电压源型逆变器通过电抗器接入系统, 其主电路原理如图 1 所示。

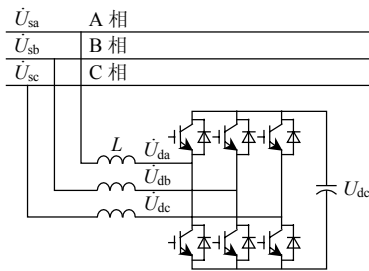


图 1 DSTATCOM 主电路  
Fig. 1 Main circuit of DSTATCOM

图 1 中:  $\dot{U}_{sa}$ 、 $\dot{U}_{sb}$ 、 $\dot{U}_{sc}$  分别表示电网公共接入点 (point of common coupling, PCC) 处的电压;  $\dot{U}_{da}$ 、 $\dot{U}_{db}$ 、 $\dot{U}_{dc}$  分别表示 DSTATCOM 输出的基波电压分量。根据控制理论中的冲量等面积原理, 可以采用 PWM 技术控制 DSTATCOM 中 IGBT 的开、关来产生与调制波频率和相位相同、幅值可调的电压, 此时 DSTATCOM 就可以看作一个频率、相位和幅值可以控制的交流电压源。

从图 1 可知, DSTATCOM 输出的电流是由作用在连接电抗器上的电压差 (DSTATCOM 各相输出电压与接入点电网电压的向量差) 决定, 因此控制调制波的频率、相位和幅值就可以控制 DSTATCOM 输出与电网同频率、相位和幅值满足补偿要求的目标电流。

#### 1.2 数学模型

虽然大容量 STATCOM 装置的输入输出之间存在较强的非线性关系, 但对于小容量 DSTATCOM 装置, 其输入输出特性的非线性表现不明显<sup>[5]</sup>。因

此可以将 DSTATCOM 的全部损耗近似等效为串联电抗器的电阻, 而将逆变器输出电压等效为一个纯无功电压源, 则 DSTATCOM 近似的稳态等值电路如图 2 所示。

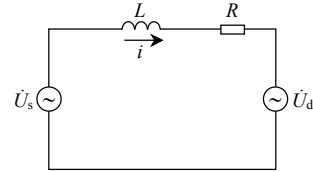


图 2 DSTATCOM 近似稳态等值电路  
Fig. 2 Stability-state equivalent circuit of DSTATCOM

通过对图 2 的分析与计算, 可得到 DSTATCOM 的稳态数学模型<sup>[20]</sup>为

$$P = U_s^2 \sin^2 \delta / R \tag{1}$$

$$Q = U_s^2 \sin 2\delta / 2R \tag{2}$$

式中:  $P$  为 DSTATCOM 吸收的有功功率;  $Q$  为 DSTATCOM 吸收的无功功率;  $\delta$  为 DSTATCOM 输出电压与电网电压的相位差。

由式(1)可知, 无论  $\delta$  怎样变化, DSTATCOM 吸收的有功功率始终为正, 即 DSTATCOM 总是作为负载消耗有功, 因此可以通过控制  $\delta$  的大小来稳定 DSTATCOM 直流侧电容电压。由式(2)可知, 随着  $\delta$  的变化, DSTATCOM 吸收的无功功率可以在正、负之间变化, 即 DSTATCOM 可吸收容性无功或感性无功, 这为利用 DSTATCOM 的稳态数学模型从感性到容性, 实现动态、连续调节无功补偿电流奠定了理论基础。

### 2 基于逆系统模型的双变量非线性控制器

文献[5]通过仿真试验与现场所测数据对比, 证实了大容量 STATCOM 装置的输入输出之间存在较强的非线性关系, 但对于小容量 STATCOM 装置, 由于其铜损耗所占比例大, 而非线性电阻所占比例较小, 因此其输入输出特性的非线性表现不明显。对于 DSTATCOM 控制器的设计, 可以利用式(2)来设计逆系统控制器作为主控制器, 可使装置输出的无功功率逼近补偿目标值。

对式(2)进行计算, 可以得到 DSTATCOM 在稳态时输出的无功电流  $I_q$  与  $\delta$  的关系式为

$$I_q = U_s \sin 2\delta / 2R \tag{3}$$

由于 DSTATCOM 在正常工作时  $\delta$  很小, 则  $\sin \delta = \delta$ , 于是可得到

$$I_q = U_s \delta / R \tag{4}$$

根据参考文献[19]的方法, 可以求得稳态逆系统模型为

$$\delta = RI_q / U_s \quad (5)$$

由于式(5)是由 DSTATCOM 的近似稳态数学模型得到的逆控制器，它不可能准确控制非线性 DSTATCOM 装置，又因  $\delta$  的变化对电流变化影响很大<sup>[20]</sup>，所以本文采用电流闭环反馈控制作为辅助控制器，通过调节调制比  $M$  对补偿电流进行精确控制。

对于给 DSTATCOM 提供工作电压的直流侧电容，其直流电压的不稳定对装置性能带来许多不利影响<sup>[21]</sup>。由式(1)可知，无论 DSTATCOM 是工作在感性无功补偿或容性无功补偿状态，即  $\delta$  值是正或负，DSTATCOM 吸收的有功功率始终为正，且其大小仅与控制变量  $\delta$  值相关，因此本文通过调节  $\delta$  来控制直流电容电压的稳定，控制器采用文献[22]中的非线性 PID 控制技术。

结合控制系统的响应曲线和常规 PID 调节原理，对常规 PID 控制参数特性进行分析，可得到非线性 PID 调节器的控制输出函数为

$$U(t) = K_p(E_p(t))E_p(t) + K_i(E_p(t))\int_0^t E_p(t)dt + K_d(E_p(t))\frac{dE_p(t)}{dt} \quad (6)$$

式中： $K_p(E_p(t))$ 、 $K_i(E_p(t))$ 、 $K_d(E_p(t))$ 为分析得到的常规 PID 控制器的比例、积分、微分系数的整定规律，具体分析过程参考文献[22]。该原理设计的非线性 PID 控制器具有根据被动对象参数变化自动整定控制器参数的能力，自适应能力较强。

本文设计的非线性 PID 控制器的部分程序源代码如下：

```
function sys = mdlUpdate(t,x,u)
function sys = mdlInitializeSizes;
switch flag,
case 0,
[sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes;
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 8;
sizes.NumOutputs = 1;
sizes.NumInputs = 2;
sizes.DirFeedthrough = 0;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = [2;0.5;0.5;0;0;0;0;0];
if((u(1) - u(2)) > 0)
x(4) = u(1) - u(2);
x(5) = (x(4) - x(7)) / 0.001;
```

```
x(1) = x(1) + 1.0*(1 - sech(0.8*x(4)));
x(2) = x(2) + 0.5/(1 + 2.5*exp(0.30*x(4)));
x(3) = 1.0*sech(1.0*x(4));
x(6) = x(6) + x(4)*0.0001;
x(8) = x(8) + x(1)*x(4) + x(2)*x(5) + x(3)*x(6);
x(7) = x(4);
x = [x(1);x(2);x(3);x(4);x(5);x(6);x(7);x(8)];
sys = x;
else
...
```

综合上述分析，基于逆系统模型的双变量非线性控制器的原理如图 3 所示。

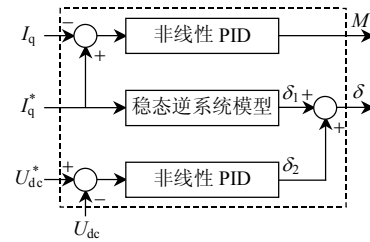


图 3 控制器原理

Fig. 3 Principle diagram of controller

该控制器的工作原理是：装置启动时，因补偿电流为零，直流电容电压  $U_{dc}$  为零，则由式(5)和式(1)得到的  $\delta$  较大，加速直流电容的充电；当  $U_{dc}$  达到一定值时，装置开始输出补偿电流  $I_q$ ，则  $\delta$  逐渐变小，同时为了保持补偿电流跟踪目标电流，则调制比  $M$  值逐渐变大；当  $U_{dc}$  等于目标电压值时， $\delta$  为一接近于零的很小数值，保持对装置本身有功损耗的补偿，此时主要由电流闭环反馈控制对补偿电流进行精确控制。整个控制过程，参数变化平稳，非线性 PID 控制技术又使得装置具有较好的自适应能力，在感性负载与容性负载切换时，由于逆系统模型的直接跟踪作用，使得装置的补偿电流能及时跟踪负载变化。

### 3 模拟实验与结果分析

为了验证本文控制策略对感性无功或容性无功的补偿效果，以及在感性无功和容性无功之间切换时，DSTATCOM 的快速响应及自适应能力，设计了如下模拟实验方案：实验启动前，负载功率为  $20 + j15$  kVA，直流电容电压为 0 V；DSTATCOM 实验装置启动并运行 0.5 s；在运行至 0.5 s 时，负载功率切换为  $20 - j15$  kVA，再运行 0.7 s。图 4—8 为模拟实验关键参数的曲线记录。

从图 4、5 对比可以看出，无 DSTATCOM 装置时，PCC 处 A 相电流的相位明显滞后或超前 A 相

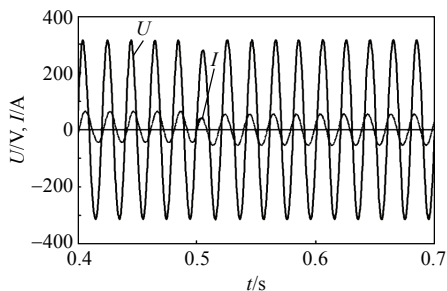


图 4 DSTATCOM 未投运时电网电压电流波形  
Fig. 4 Waveform of voltage and current of grid before DSTATCOM operating

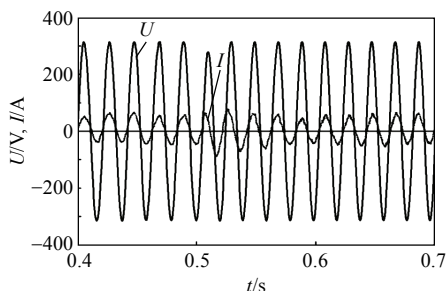


图 5 投运 DSTATCOM 后电网电压电流波形  
Fig. 5 Waveform of voltage and current of grid after DSTATCOM operating

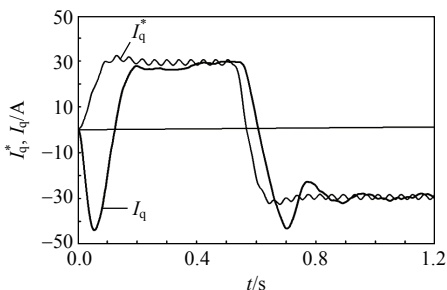


图 6 投运 DSTATCOM 后  $I_q^*$  和  $I_q$  曲线  
Fig. 6 Curve of  $I_q^*$  and  $I_q$  after DSTATCOM operating

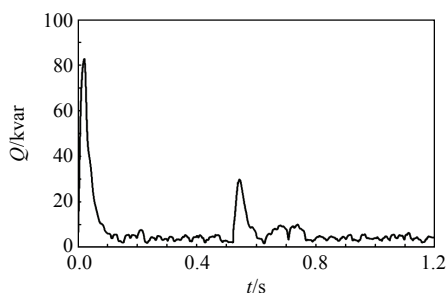


图 7 投运 DSTATCOM 后电网侧无功功率曲线  
Fig. 7 Reactive power curve of grid side after DSTATCOM operating

电压相位, 有 DSTATCOM 补偿时 PCC 处 A 相电压与电流的相位几乎同步, 即使在负载由感性切换至容性时(0.5s), 只需 2 个电波周期即可达到近乎完全补偿。

图 6 为有 DSTATCOM 装置补偿时, DSTATCOM 输出的无功补偿电流  $I_q$  跟踪目标电流  $I_q^*$  的曲线。从图 6 可知, 装置完成直流侧电容充电和达到目标电

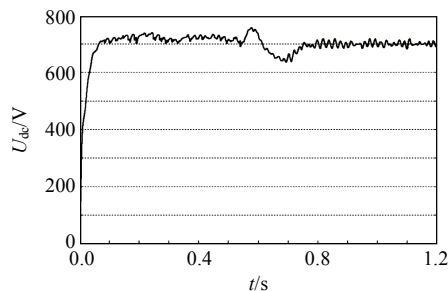


图 8 直流侧电容电压  $U_{dc}$  曲线  
Fig. 8 Voltage curve of direct-current side capacitor after DSTATCOM operating

流只需约 180 ms, 在稳定工作状态, 能稳定、准确地跟踪目标电流。图 7 进一步验证了采用本文控制方法的 DSTATCOM 对无功补偿的良好效果。

图 8 为直流侧电容电压  $U_{dc}$  曲线。可以看出, 在整个实验过程中  $U_{dc}$  很稳定, 即使在负荷切换的恶劣条件下, 其波动幅度也在 10% 以内, 这为装置稳定、准确地补偿目标电流提供了保证。

#### 4 结论

- 1) 由主、辅 2 个控制器共同完成电流控制, 并能保证直流侧电压具有良好的稳定性, 既保证了响应速度, 又保证了控制精度。
- 2) 在保证良好控制性能的前提下, 克服了要求被控对象的数学模型精确已知的难题。
- 3) 引入了非线性 PID 控制技术, 在负荷变化时具有很好的自适应能力。

#### 参考文献

- [1] Zhang Z, Fahmi N R. Modeling and analysis of a cascade 11-level inverters-based SVG with control strategies for electric arc furnace (EAF) application[J]. IEE Proceedings Generation Transmission Distribution, 2003, 150(2): 217-223.
- [2] Collins C D, Bathurst G N, Watson N R, et al. Harmonic domain approach to STATCOM modeling[J]. IEE Proceedings Generation Transmission Distribution, 2005, 152(2): 194-200.
- [3] Xi Zhengping, Bhattacharya S. Current control of angle controlled STATCOM[C]/39th North American Power Symposium. Las Cruces, USA: NM, 2007: 322-328.
- [4] 陈志业, 尹华丽, 李鹏. 电能质量及其治理新技术[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 67-70.  
Chen Zhiye, Yin Huali, Li Peng. Power quality problem and new technology for its improvement[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 67-70(in Chinese).
- [5] 姜齐荣, 蒋霞, 梁旭, 等. 大容量 STATCOM 装置的非线性特性[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43(3): 326-332.  
Jiang Qirong, Jiang Xia, Liang Xu, et al. Nonlinear characteristics of a large capacity STATCOM[J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology Edition, 2003, 43(3): 326-332(in Chinese).
- [6] 魏文辉, 刘文华, 宋强, 等. 基于逆系统方法有功/无功解耦 PWM 控制的链式 STATCOM 动态控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,

- 2005, 25(3): 23-28.  
Wei Wenhui, Liu Wenhua, Song Qiang, et al. Research on fast dynamic control of static synchronous compensator using cascade multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 23-28(in Chinese).
- [7] 武小梅, 严干贵. 基于级联式电压源逆变器的静止同步补偿器直流电压控制策略[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 49-53.  
Wu Xiaomei, Yan Gangui. Control strategy of DC capacitor voltage of static synchronous compensator based on cascaded multilevel voltage source inverter[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 49-53(in Chinese).
- [8] 邓家泽, 王奔, 黄崇鑫, 等. 基于晶闸管 STATCOM 的无功补偿控制[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 48-51.  
Deng Jiaye, Wang Ben, Huang Chongxin, et al. Reactive power compensation control based on thyristor based STATCOM[J]. Power System Technology, 2009, 33(1): 48-51(in Chinese).
- [9] 兰华, 尹鹏, 蔡国伟, 等. 风电场中静止同步补偿器的输入-输出反馈线性化控制[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 141-145.  
Lan Hua, Yin Peng, Cai Guowei, et al. Input-output feedback linearization control for static synchronous compensator in wind farm [J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 141-145(in Chinese).
- [10] Meng X P, Wang H, Zhao L, et al. Controlling study of DSTATCOM based on reinforcement learning adaptive PID[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics. Shenyang, China: IEEE, 2009: 1208-1211.
- [11] 唐杰, 罗安, 荣飞, 等. 直接电流控制的配电网静止无功发生器用于改善电压质量的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(S2): 611-614.  
Tang Jie, Luo An, Rong Fei, et al. Study on direct current controlled distribution static synchronous compensator used for improvement of voltage quality[J]. Power System Technology, 2006, 33(S2): 611-614(in Chinese).
- [12] 王松岑, 于坤山, 汤广福. DSTATCOM 用于减缓电压跌落的双矢量控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 82-86.  
Wang Songcen, Yu Kunshan, Tang Guangfu. Double vector controller design of DSTATCOM to mitigate voltage sags[J]. Automations of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 82-86(in Chinese).
- [13] 罗安, 欧剑波, 唐杰, 等. 补偿配电网电压不平衡的静止同步补偿器控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(6): 55-60.  
Luo An, Ou Jianbo, Tang Jie, et al. Research on control method of STATCOM for grid voltage unbalance compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(6): 55-60(in Chinese).
- [14] 王玉斌. 配电系统动态无功补偿技术的研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [15] 伏祥运, 曾繁鹏, 王建斌, 等. STATCOM 的自适应逆控制方法[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(6): 636-640.  
Fu Xiangyun, Zeng Fanpeng, Wang Jianze, et al. Adaptive inverse control for STATCOM[J]. Electrical Machines and Control, 2006, 10(6): 636-640(in Chinese).
- [16] Singh B, Solanki J, Verma V. Neural net-work based control of reduced rating DSTATCOM[C]//IEEE Indicon 2005 Conference. Chennai, India: IEEE, 2005: 516-520.
- [17] 侯勇, 谢广志, 童建东. 基于 $\alpha\beta$ 系统的 DSTATCOM 积分型滑模变结构控制[J]. 电工电能新技术, 2007, 26(1): 25-28.  
Hou Yong, Xie Guangzhi, Tong Jiandong. Sliding-mode variable structure with integral action under frame for DSTATCOM[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2007, 26(1): 25-28(in Chinese).
- [18] Harsha V P, Kalyan K B, Mahesh K. A robust controller for DSTATCOM[C]//POWERENG 09 Conference. Lisbon, Portugal: Universidade Nova Lisboa, 2009: 546-551.
- [19] 戴先中. 多变量非线性系统的神经网络逆控制方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 115-121.
- [20] 姜齐荣, 谢小荣, 陈建业. 电力系统并联补偿: 结构、原理, 控制与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 82-100.
- [21] 刘钊, 刘邦银, 段善旭, 等. 链式静止同步补偿器的直流电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 7-12.  
Liu Zhao, Liu Bangyin, Duan Shanxu, et al. DC capacitor voltage balancing control for cascade multilevel STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 7-12(in Chinese).
- [22] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 Matlab 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 189-196.



肖华根

收稿日期: 2010-07-20.

作者简介:

肖华根(1979), 男, 助理工程师, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析与控制、柔性交流输电, E-mail: xiaohuagen@163.com;

刘桂英(1964), 女, 副教授, 硕士, 研究方向为电力系统运行分析与控制、电能质量检测;

粟时平(1963), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力系统运行分析与控制、电能质量控制、分布式发电;

蒋陆萍(1973), 女, 讲师, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护与控制;

张伊洁(1985), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制、智能电网。

(责任编辑 王晔)