

基于蓄电池储能的光伏并网发电功率平抑控制研究

邱培春¹, 葛宝明¹, 毕大强²

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 针对光伏发电因光照强度与温度变化而导致的发电功率波动问题, 提出一种储能型光伏并网发电系统, 以抑制并网功率的波动。以光伏发电最大功率跟踪和并网逆变控制为基础, 引入蓄电池储能系统, 实现对发电功率削峰填谷、平抑的功能。光伏发电系统采用两级功率变换结构, 以最小化逆变器容量, 解耦最大功率控制与逆变并网控制。在逆变器直流母线上并接双向DC/DC变换器, 对储能电池充放电予以管理。在功率平抑控制中, 储能系统采用双环控制, 内环控制储能电池电流, 外环则分两种情况: 1) 电网正常时为功率外环; 2) 电网故障时为电压外环。系统不仅具有最大功率跟踪和并网发电功能, 还具有并网功率平抑功能。当电网因故障而断开时, 系统将光伏发电能量储入蓄电池, 提高了发电效率, 确保了直流母线电压稳定。对整个系统建立仿真模型和实验样机, 仿真和实验结果验证了所提出的控制方法可行、有效。

关键词: 光伏发电; 最大功率跟踪; 并网逆变; 储能系统; 功率平抑

Battery energy storage-based power stabilizing control for grid-connected photovoltaic power generation system

QIU Pei-chun¹, GE Bao-ming¹, BI Da-qiang²

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An energy storage-based grid-connected photovoltaic (PV) power generation system is proposed to overcome the fluctuation of grid-injected power caused by the change of illumination intensity and temperature. On the basis of Maximum Power Point Tracking (MPPT) and grid-connected DC/AC conversion, a battery-based energy storage control system is employed to smooth the grid-injected power. Two-stage power conversion structure is adopted to minimize the capacity of switching devices and make the MPPT and DC/AC control decoupling. A bi-directional DC/DC converter couples the DC link bus to control the charging and discharging of battery bank, and double closed-loops improve the performance of energy storage system, where the inner loop controls the battery current and the outer loop controls the grid-injected power normally or DC link voltage when the grid disconnects. The proposed system not only has the function of MPPT and grid-connected generation, but also possesses the ability of power stabilization. It can keep the DC-link voltage constant through storing solar energy in the battery during the grid fault, which will improve the power generation efficiency greatly. The simulated model and experimental model of the whole system are established and the simulated and experimental results verify the feasibility and effectiveness of the proposed control system.

Key words: PV power generation; MPPT; DC/AC conversion; energy storage system; power stabilization

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)03-0029-05

0 引言

光伏发电无污染、无噪音、运行成本低, 是理想的可持续能源, 发展前景好。据预测, 到 2050 年太阳能在能源结构中的比例将达到 13.5%, 是未来化石能源的主要替代能源之一^[1-2]。

经过多年的发展, 光伏发电正逐渐从过去的小规模离网系统, 向大规模并网发电方向发展。基于

最大功率跟踪控制^[3-5] (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 和各种并网逆变控制^[6-8]的光伏并网发电技术得到了广泛研究。但是, 由于光照和温度变化无常, 光伏电站输出的功率并不稳定, 导致电压波动^[9]。当前, 光伏电站在电力系统中所占比例很小, 功率波动对电网影响不大。可是随着兆瓦级光伏电站的建设, 其规模将不断增大, 当发电功率达到一定比例时, 功率波动会给电网运行带来危害^[10]。另外, 当电网故障断开时, 光伏阵列将停止发电, 降低了系统效率。

基金项目: 台达电力电子科教发展计划基金资助 (DREG2009006)

本文研究基于蓄电池储能的光伏并网发电功率平抑控制，以解决上述问题。提出了控制方法，并通过仿真和实验验证了其可行性和有效性。

1 储能型光伏并网发电系统

为实现最大功率跟踪、并网逆变和功率平抑等功能，采用图 1 所示的系统结构。Boost 变换器主要用于实现最大功率跟踪，同时把光伏阵列较低的电压升到较高的电压，供三相逆变桥使用；三相逆变桥用于实现并网逆变；由双向 DC/DC 变换器和蓄电池构成的储能系统用于实现并网功率平抑控制，以及电网故障时存储光伏阵列发出的能量。

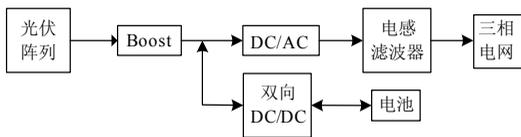


图 1 系统结构
Fig.1 System topology

2 光伏并网发电

2.1 最大功率跟踪

光伏电池具有很强的非线性特征^[11]，其 I-V 特性和 P-V 特性如图 2 所示。当光照和温度一定时，光伏电池输出电压随负载变化，而且在某一电压值时输出功率最大，此工作点即为最大功率点，而且最大功率点随光照和温度的变化而变化。因此，在光伏发电系统中，常采用最大功率跟踪控制，随着光照和温度变化实时调整光伏阵列的工作电压，使其尽可能工作在最大功率点。

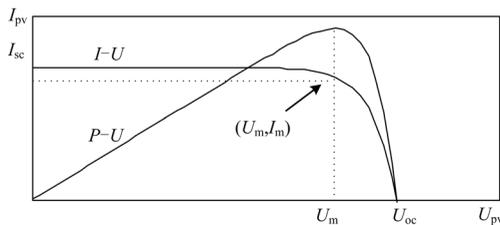


图 2 光伏电池的 I-V 特性和 P-V 特性
Fig.2 I-V and P-V characteristics

本文采用扰动观察法^[3]实现最大功率跟踪控制，流程图如图 3。通过给光伏阵列工作点电压施加扰动 ΔU ，同时记录扰动后的输出功率，如果输出功率增加，则保持原方向继续扰动，否则反方向扰动，最终使光伏阵列工作在最大功率点附近。

2.2 并网逆变

光伏并网发电时，期望输出电流波形正弦度高、谐波小、功率因素为 1，实现这一目标的关键是逆

变器的控制方法。在逆变器中，电压源型逆变器最普遍。光伏发电系统和电网相当于两个电源并联，如果对电压源型逆变器采用输出电压控制，则容易导致环流；如果采用输出电流控制，则可以有效控制输出电流，在逆变器输出电流与电网电压同步时，实现功率因数为 1，而且控制方法简单。图 4 给出了 DC/AC 控制的流程图，采用 SVPWM 和双环控制结构^[8,12-13]，外环控制直流母线电压，内环控制逆变器输出电流。

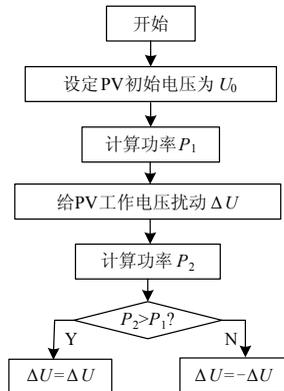


图 3 扰动观察法控制流程图
Fig.3 P&O control flow chart

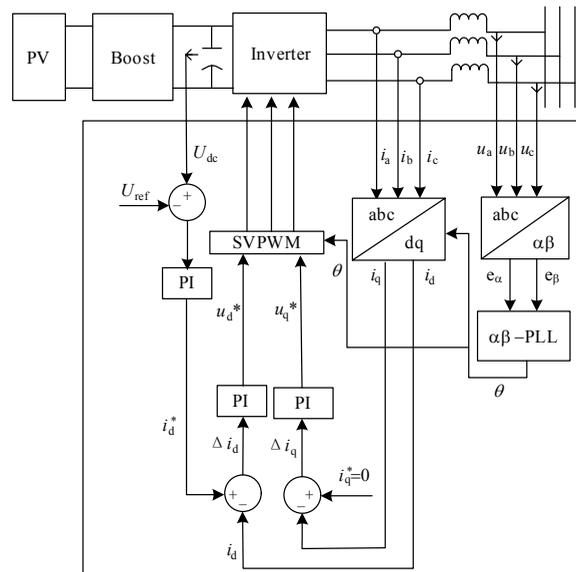


图 4 DC/AC 控制框图
Fig.4 DC/AC control

3 储能系统

储能系统主要由一个双向 DC/DC 变换器和蓄电池组成。双向 DC/DC 变换器并联在逆变器直流母线上，根据光伏阵列发出的功率和电网反馈回来的信息，控制蓄电池的能量流动。双向 DC/DC 变

换器采用半桥结构, 如图 5 所示, 其中开关管 G1 和 G2 互补工作^[14]。当光伏阵列发出功率大于给定的并网功率时, 蓄电池充电, 此时双向 DC/DC 变换器工作在 Buck 电路模式。当光伏阵列发出功率小于给定的并网功率时, 蓄电池放电, 此时双向 DC/DC 变换器工作在 Boost 电路模式。

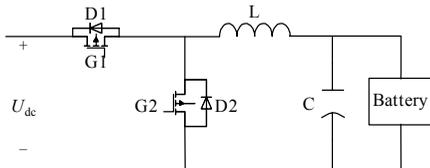


图 5 双向 DC/DC 变换器拓扑结构

Fig.5 Bi-directional DC/DC converter topology

光伏阵列输出的功率是波动的, 而且变化率较大, 大致可分为相对高频的波动功率和相对低频的波动功率两部分。蓄电池随着相对高频的功率波动充电或者放电, 通过削峰、填谷实现并网功率的平抑、减小其变化率^[15]。在电网故障时, 将电网断开, 把光伏阵列发出的功率都存储到蓄电池, 这样光伏阵列仍能继续发电, 提高了系统发电效率, 同时起到稳定直流母线电压的作用, 防止电压过高而损坏设备。

储能系统的控制流程图如图 6 所示。电网正常时, 外环是功率控制环, 光伏阵列发出的波动功率 P 经过低通滤波器滤波, 滤除高频量, 减小变化率, 其输出值作为并网功率的给定值 P^* ; 将 P^* 与逆变器并网的实际功率值 P_g 比较, 误差 e_1 经过 PI 调节器, 以调整电池的工作电流参考值 I^* 。当电网由于故障断开时, 外环是直流母线电压控制环, 将直流母线实际电压值 U 作为反馈信号, 与给定电压值 U_{ref} 比较, 误差 e_2 经过 PI 调节器, 以调整电池的工作电流参考值 I^* 。内环为电池工作电流控制环, 使电池实际的工作电流值 I 跟踪外环给定的电流参考值 I^* 。在外环 PI 调节器之后采用限幅环节, 以限制电池工作电流。此外, 系统设计有电池过充、过放保护控制, 以确保电池安全运行。

4 仿真分析

为了验证本文所提出的储能型光伏并网发电系统功能, 开展了仿真研究。在标准光照和标准温度下, 光伏阵列开路电压 320 V, 短路电流 20.65 A, 最大功率点电压 290.4 V; 电网相电压 220 V, 频率 50 Hz; 直流母线参考电压 600 V, 储能电池是额定电压 150 V、额定容量 150 Ah 铅酸蓄电池。

仿真时, 光照情况如图 7 (a) 中曲线 S 所示,

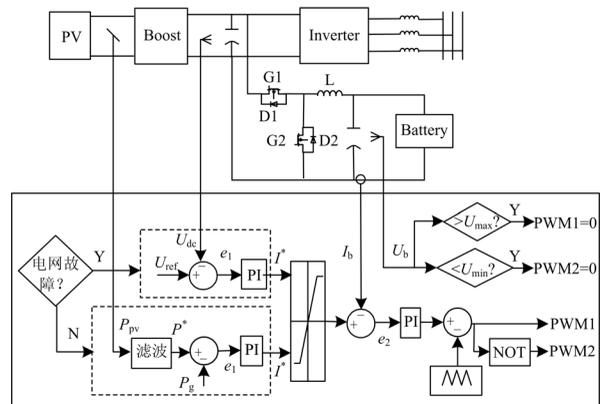
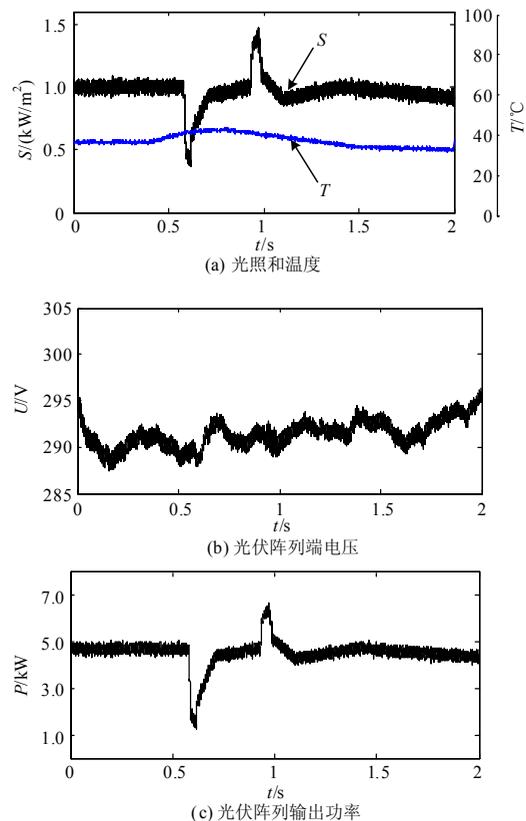


图 6 双向 DC/DC 控制框图

Fig.6 Bi-directional DC/DC converter control

在 0.6 s 时模拟受云朵的影响光照急剧下降, 持续一段时间后恢复正常, 在 $t=0.9$ s 的时候光照突然变强, 持续一段时间后又恢复到正常值; 温度如图 7 (a) 中曲线 T 所示。图 7 (b) 和 7 (c) 分别是光伏阵列工作端电压和光伏阵列输出功率, 可见 MPPT 控制使光伏阵列始终工作在最大功率点电压 290 V 附近, 在不同光照和温度下, 持续输出最大功率。图 7 (d) 是逆变器输出的 a 相电流和电网 a 相电压, 可以看出逆变器输出的电流波形正弦度好, 几乎和电网电压同频同相, 功率因数为 1。



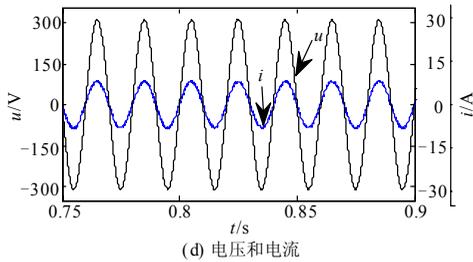


图 7 MPPT 和逆变输出结果

Fig.7 MPPT and DC/AC simulation results

图 8 是储能系统的仿真结果，温度和光照情况同上，在 $t=1.5\text{ s}$ 的时候电网因故障断开。图 8 (a) 中， P_{pv} 、 P_g 和 P_b 分别是光伏阵列输出的功率、并网功率和电池的工作功率。温度和光照的变化导致光伏阵列输出的功率波动较大，但在储能系统的作用下，并网功率变得平缓、变化率减小，实现了功率平抑控制。当电网故障断开时，光伏阵列仍能继续发电，提高了系统的发电效率。图 8 (b) 为电池工作电流，正值表示放电，负值表示充电，随着光伏阵列发出功率的变化，电池能快速改变工作电

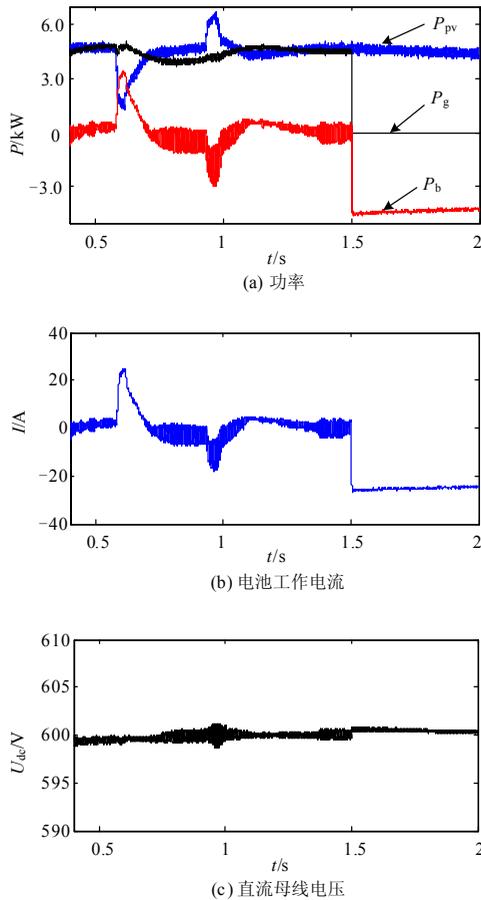


图 8 储能系统的结果

Fig.8 Energy storage system simulation results

流，配合功率平抑控制对能量予以管理。图 8 (c) 是直流母线电压，即使在电网故障切除时，直流母线电压也能控制在 600 V 左右。

5 实验分析

通过实验，重点验证储能系统的功率平抑控制功能。实验平台由双级式光伏并网逆变器和双向 DC/DC 变换器构成，储能单元由 4 个铅酸蓄电池串联组成，单只额定电压 12 V、额定容量 100 Ah。光伏电池由电压可调的直流电源模拟，通过调节直流电源的输出电压，模拟光伏阵列运行点的变化及输出功率的波动。

实验结果见图 9，其中，图 9 (a) 展示了直流电源模拟的光伏阵列功率、并网逆变器输出功率和电池工作功率，分别用符号 P_{pv} 、 P_g 和 P_b 表示；图 9 (b) 是蓄电池的工作电流，正值表示充电，负值

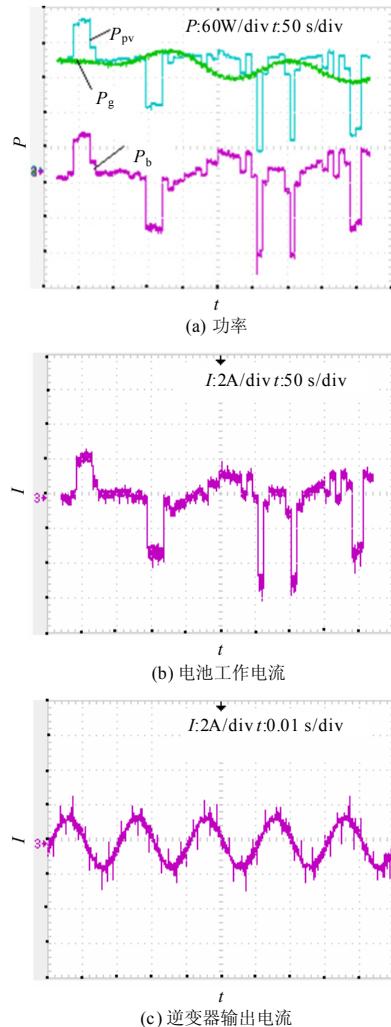


图 9 功率平抑实验结果

Fig.9 Experiment results of power stabilization

表示放电; 图 9 (c) 是逆变器输出的电流。可见, 逆变器输送到电网的功率得到了有效的平抑, 变化率得到了控制, 随着光伏阵列输出功率的波动, 双向 DC/DC 变换器能快速地调整蓄电池能量的流动。

6 结论

提出的储能型光伏并网发电系统, 有效解决了光伏功率波动的问题。系统不仅实现了最大功率跟踪和并网发电, 而且通过功率平抑控制, 有效地稳定了并网功率。当电网故障断开时, 光伏阵列仍然可以发电, 将能量存储于电池, 提高了系统效率。仿真和实验结果验证了本文所提系统的可行性和优良性能。

参考文献

- [1] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓璞, 等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 1-9.
ZHAO Zheng-ming, LIU Jian-zheng, SUN Xiao-ying, et al. The photovoltaic generation and application of the solar energy[M]. Beijing: Science Press, 2005: 1-9.
- [2] 吴玉蓉, 张国琴. 基于DSP控制的单相光伏并网逆变器的设计[J]. 继电器, 2008, 36(4): 51-56.
WU Yu-rong, ZHANG Guo-qin. Design of single phase photovoltaic grid-connected inverter system based on DSP[J]. Relay, 2008, 36(4): 51-56.
- [3] 李炜, 朱新坚. 光伏系统最大功率点跟踪控制仿真模型[J]. 计算机仿真, 2006, 23 (6) : 239-249.
LI Wei, ZHU Xin-jian. The maximum power point tracking control of photovoltaic power system[J]. Computer Simulation, 2006, 23 (6) : 239-243.
- [4] Kim T Y, Ahn H G, Park S K, et al. A novel maximum power point tracking control for photovoltaic power system under rapidly changing solar radiation[C]. // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, June 12- June 16, 2001, Korea (Pusan) : 2001: 1011-1014.
- [5] 孙自勇, 宇航, 严干贵, 等. 基于PSCAD的光伏阵列和MPPT控制器的仿真模型[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 61-64.
SUN Zi-yong, YU Hang, YAN Gan-gui, et al. PSCAD simulation models for photovoltaic array and MPPT controller[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 61-64.
- [6] Gokhale Kalyan P, Kawamura Atsuo, Hoft Richard G. Deadbeat microprocessor control of PWM inverter for sinusoidal output waveform synthesis[C]. // IEEE Power Electronics Council, New York(USA); ESA, Paris, Fr. PESC Record-IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference: 1985: 28-36.
- [7] 戴洲江, 晁勤. 单相光伏并网逆变器固定滞环的电流控制[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 12-17.
DAI Xun-jiang, CHAO Qin. Current control of constant hysteresis band for single phase photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 12-17.
- [8] 周德佳, 赵争鸣, 袁立强, 等. 基于同步矢量电流比例-积分控制器的光伏并网系统[J]. 清华大学学报, 2008, 49 (1) : 33-36.
ZHOU De-jia, ZHAO Zheng-ming, YUAN Li-qiang, et al. Photovoltaic grid-connected system based on asynchronous current vector PI controller[J]. Journal of Tsinghua University, 2008, 49 (1) : 33-36.
- [9] Senjyu Tomonobu, Datta Manoj, Yona Atsushi Kim. A control method for small utility connected large PV system to reduce frequency deviation using a minimal-order observer[J]. IEEE Trans Energy Covers, 2009, 24 (2) : 520-528.
- [10] 杜朝波, 卢勇, 严玉廷. 并网光伏发电系统运行特性分析[J]. 云南电力技术, 2009, 37 (3) : 6-8.
DU Chao-bo, LU Yong, YAN Yu-ting. Analysis of operating characteristic of grid-connected photovoltaic power system[J]. Yunnan Electric Power, 2009, 37(3) : 6-8.
- [11] Hussein K H, Muta I, Hoshino T, et al. Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions[J]. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 1995, 142 (1) : 59-64.
- [12] 张凌. 单相光伏并网逆变器的研制[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
ZHANG Ling. The design of single-phase PV grid-connected inverter[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [13] Bose B K. Modern power electronics and AC drives[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 151-217.
- [14] 许海平, 孙昌富, 马钢, 等. 基于DSP的燃料电池车用双向DC-DC变换器的研究[J]. 电气自动化, 2004, 26 (3) : 33-35.
XU Hai-ping, SUN Chang-fu, MA Gang, et al. Bi-directional DC-DC converter for fuel cell electric vehicle basing on DSP[J]. Electrical Automation, 2004, 26 (3) : 33-35.
- [15] Shigematsu Toshio1, Kumamoto Takahiro1, Deguchi Hiroshige1, et al. Applications of a vanadium redox-flow battery to maintain power quality[C]. // IEEE power engineering society, IEEE Japan. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. Yokohama (Japan) : 2002: 1065-1070.

收稿日期: 2010-03-01; 修回日期: 2010-05-06

作者简介:

邱培春 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动; E-mail: 08121980@bjtu.edu.cn

葛宝明 (1971-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机及其控制;

毕大强 (1973-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统主设备继电保护, 电力电子技术在电力系统中的应用。